



国际机械工程先进技术译丛

燃料电池 模拟、控制和应用

FUEL CELLS
Modeling , Control
and Applications

(美) Bei Gou Woon Ki Na Bill Diong 著
刘通 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





国际机械工程先进技术译丛

燃料电池模拟、控制和应用

(美) Bei Gou Woon Ki Na Bill Diong 著
刘 通 译



机械工业出版社

本书侧重于质子交换膜燃料电池系统的模拟和控制技术,并详细讲述了在汽车和混合发电系统方面的应用。模拟和控制技术对于燃料电池系统的设计和性能至关重要。这本权威著作由直接参与研究的专家所著,内容深入浅出,概括了这个领域的最新研究成果,给出了大量建模和控制的例子、测试结果和重要文献。

本书适用于燃料电池和能源领域的教师、学生、顾问、制造商、研究人员和工程师,既可以作为一本燃料电池模拟和控制设计的入门教材,又可以作为一本深入研究的参考书。

Fuel Cells Modeling, Control, and Applications/by Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong/ISBN: 978 - 1 - 4200 - 7161 - 0

Copyright© 2010by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 01 - 2010 - 1528

图书在版编目 (CIP) 数据

燃料电池模拟、控制和应用/ (美) 北勾等著;
刘通译. —北京: 机械工业出版社, 2011. 7
(国际机械工程先进技术译丛)
ISBN 978 - 7 - 111 - 34782 - 8

I. ①燃… II. ①北…②刘… III. ①燃料电池 - 研
究 IV. ①TM911. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 093674 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 孔 劲 责任编辑: 郑 铨

版式设计: 霍永明 责任校对: 吴美英

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2011 年 10 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13 印张 · 256 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 34782 - 8

定价: 48.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

策划编辑: (010) 88379772

社服 务 中 心: (010) 88361066

网络服务

销 售 一 部: (010) 68326294

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部: (010) 88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

译 丛 序 言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是 20 世纪 80 年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持。制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面；制造技术既有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流渊源流长

近年来,国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用,制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到,我国制造业与工业发达国家相比,仍存在较大差距。因此必须加强原始创新,在实践中继承和创新,学习国外的先进制造技术和经验、引进、消化、吸收、创新,提高自主创新能力,形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史,可以追溯到唐朝甚至更远一些,唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式,早在 20 世纪初期,我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》,其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》,对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体,图书是一个海洋,虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段,但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性,看书总比在计算机上看资料要方便习惯,不同层次的要求可以参考不同层次的图书,不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书,同时它具有比较长期的参考价值 and 收藏价值。当然,技术图书的交流具有时间上的滞后性,不够及时,翻译的质量也是个关键问题,需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者做出贡献,为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源,翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作,从而能够提升我国制造业的自主创新能力,引导和推进科研与实践水平的不断进步。

三、选择严谨,质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书,在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量,力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担,充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书,组成一套《国际机械工程先进技术译丛》。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上具有先进性、经典性、广泛性,应能代表相关专业的技术前沿,对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业,例如机械、材料、能源等,既包括对传统技术的改进,又包括新的设计方

法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员,高等院校的教师和学生,可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版《国际机械工程先进技术译丛》的专家学者,积极推荐国外相关优秀图书,仔细评审外文原版书,推荐评审和翻译的知名专家,特别要感谢承担翻译工作的译者,对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意,同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助,欢迎广大读者不吝指教,提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译者序言

由于传统使用的石油和煤炭等化石类燃料造成了日益严重的环境污染问题，很多国家都在研究推广使用可再生替代能源。在众多可再生能源中，质子交换膜燃料电池因其清洁性、高效率、低工作温度和与风能、太阳能的互补性等诸多优点，已经引起越来越多的重视。质子交换膜燃料电池的发展已经有近 50 年的历史。1962 年，美国通用电力公司首先开发了这种燃料电池，并成功用于“双子星”和“阿波罗”登月计划。1993 年，加拿大 Ballard Power Systems 公司演示了第一辆燃料电池公共汽车。之后，这个公司又与诸多汽车公司合作开发出多种燃料电池汽车。除了用于汽车以外，燃料电池的另一个主要应用领域是发电。现在世界各地已经有从亚千瓦的便携式燃料电池到数兆瓦的燃料电池发电厂。

在我国最近几个五年计划中，都把燃料电池列为重点发展的前沿技术，并投入了大量研究的人力和物力。2010 年，第二十五届世界纯电动车、混合动力车和燃料电池车大会在深圳举行，这是自 1999 年之后这个世界大会再次选择在中国召开，这也是对我国在燃料电池领域研究发展的认同。

尽管已经出版了一些燃料电池方面的著作，但本书更侧重于质子交换膜燃料电池系统的模拟和控制技术，并详细讲述了在汽车和混合发电系统方面的应用。模拟和控制技术对于燃料电池系统的设计和性能至关重要。这本权威著作由直接参与研究的专家所写，内容深入浅出，概括了燃料电池领域的最新研究成果，给出了大量建模和控制的例子、测试结果和重要文献。

本书适用于燃料电池和能源领域的教师、学生、顾问、制造商、研究人员和工程师。既可以作为一本燃料电池模拟和控制设计的入门教材，又可以作为一本深入研究的参考书。

希望本书能够在燃料电池模拟和控制设计的研发上起到推动作用。

译者

作者序言

在过去五年中，德克萨斯大学阿灵顿分校一直在独立开展燃料电池研究，同时也与德克萨斯基督教大学进行了合作。主要研究重点是用精确线性化控制法，进行质子交换膜燃料电池的建模和非线性控制设计。

目前的文献非常关注燃料电池接口的控制设计，而对燃料电池本身的控制设计研究却未给予应有的注意。这可能是由于控制设计的复杂性造成的。然而，控制对于燃料电池的运作和效率是非常重要的，本书将介绍这个专题。

本书详细讨论了燃料电池建模、分析和非线性控制，并给出了模拟的例子和测试结果，可再生能源领域的教师、学生、顾问、制造商、研究人员和设计师应该对本书感兴趣。阅读本书的读者需要掌握控制理论与燃料电池化学反应的基本知识。

本书全面介绍了质子交换膜燃料电池的建模和控制，描述了燃料电池建模和控制设计方案的典型做法和取得的成就，也包括了线性和非线性模型及控制设计。

为了方便读者，本书的结构是独立的，非常详细地介绍了最新质子交换膜燃料电池建模和控制设计研究成果的精髓。在附录中提供了线性控制和非线性控制的初步数学知识。

本书的结构设计反映了本书的宗旨。第1章和第2章简单介绍了燃料电池和燃料电池发电系统，为燃料电池系统及其部件奠定了基础。它们也是下面各章的铺垫。第3章介绍了燃料电池动态的线性和非线性建模。它为第4章涉及的线性和非线性控制设计做了预备。第4章讨论了燃料电池线性和非线性建模及控制设计的典型方法，并比较了线性和非线性控制设计及其有效性。第5章介绍了在 Simulink 中模拟燃料电池，其中包括质子交换膜燃料电池建模和控制设计，也介绍并比较了线性和非线性控制器的模拟结果。第6和第7章讨论了燃料电池在汽车、公用电力系统和独立系统中的应用，介绍并讨论了典型模型和控制方案的细节。第8章讨论了混合可再生能源发电系统的建模和分析，包括燃料电池、风能发电和太阳能发电一体化，也介绍并研究了配置和控制方案的详细情况。

我们试图在以下的讨论中保留一般性：质子交换膜燃料电池的先进建模和控制技术，以及燃料电池目前在汽车、公用电力系统和独立系统中的应用。

我们借此机会感谢德州大学阿灵顿分校（University of Texas at Arlington, UTA）和德州基督教大学（Texas Christian University, TCC），以及美国能源部（U. S. Department of Energy, DOE）的支持。我们还要感谢德州大学阿灵顿分校电机工程学系的 Kai S. Yeung 博士及前研究生 Yunzhi Chen 和 Zheng Hui 博士、德州大学艾

VIII 燃料电池模拟、控制和应用

尔帕索分校 (University of Texas at El Paso, UTEP) 机械与工业工程系的 Carter 博士和前研究生 Lu-Ying Chiu, 以及美国能源部的 Randall S. Gemmen 博士。

我们也想借此表达对 Taylor & Francis 出版集团的感激, 谢谢他们给我们机会出版这本书。

Bei Gou

Woon Ki Na

Bill Diong

写自德克萨斯州

欲了解 MATLAB[®] /Simulink[®] 软件产品信息, 请联系:

The MathWorks, Inc.

3 Apple Hill Drive

Natick, MA 01760 – 2098 USA

电话: 508 – 647 – 7000

传真: 508 – 647 – 7001

电子邮件: info@mathworks.com

网站: www.mathworks.com

作者介绍

Bei Gou 博士在德克萨斯农机大学获电机工程博士学位，从 2002 年至 2003 年在新英格兰 Independent System Operator 公司任高级分析师，从 2002 年至 2003 年在加利福尼亚州 Santa Clara 市 ABB System Control 公司任电力应用工程师，2003 年他加入德州大学阿灵顿分校电机工程系。他目前的研究领域包括电力系统的实时监测、燃料电池的非线性控制和接口设计、停电和级联故障、相量测量和状态估计、电力市场定价理论和电力系统的可靠性。Gou 博士已发表超过 70 篇期刊和会议论文。他是 Safe Power Network, LLC 创业公司的创办人，也是 IEEE 电力工程学会、IEEE 电力电子学会、IEEE 电路与系统协会、工业与应用数学学会、国际大电网会议美国全国委员会的会员。

Woonki Na 博士是伊利诺伊州 Peoria 市 Caterpillar 公司的高级电力电子和控制工程师。他目前正在领导一个研究混合交流电驱动系统的项目。Na 博士 2008 年在德州大学阿灵顿分校获电机工程博士学位。此前，他曾在韩国汉城的 LG 电子和一个电动机驱动公司做了 4 年多的电力电子工程师。他的研究兴趣包括替代和可再生能源系统、混合电力和汽车系统及电力电子。

Bill Diong 博士于伊利诺伊大学 Urbana-Champaign 分校获学士、硕士和博士学位。在返回学术界之前，他在 Sundstrand Aerospace 公司（现在称为 Hamilton-Sundstrand 公司）任高级研究工程师，获得了宝贵的实际经验。从 1999 年开始，他在德州大学 El Paso 分校做助理教授，2000 年到 2002 年被任命为电机工程 Forrest and Henrietta Lewis 荣誉教授，现在是德克萨斯州 Fort Worth 市德州基督教大学的副教授。他的研究兴趣包括电力电子系统、先进的电力和能源系统、动态系统和控制。

目 录

译丛序言

译者序言

作者序言

作者介绍

第1章 简介	1
1.1 燃料电池的历史、现状和未来	1
1.1.1 什么是燃料电池?	1
1.1.2 燃料电池的种类	2
1.2 燃料电池系统的典型组织结构	2
1.3 燃料电池动力学的重要性	2
1.4 本书的组织结构	3
参考文献	3
第2章 燃料电池的原理	4
2.1 简介	4
2.2 质子交换膜燃料电池的组件	5
2.2.1 电解质膜	5
2.2.2 膜电极组	6
2.2.3 双极板	6
2.2.4 加热或冷却板	7
2.3 配套设备的组件	7
2.3.1 水管理	8
2.3.2 热管理	8
2.3.3 燃料储存和加工	8
2.3.4 功率调节	8
参考文献	9
第3章 燃料电池的线性和非线性动态模型	10
3.1 简介	10
3.2 符号命名	10

3.3 质子交换膜燃料电池的非线性动态模型	11
3.3.1 稳态和动态电压-电流特性的统一模型	11
3.3.2 模拟结果	13
3.3.3 质子交换膜燃料电池非线性模型的控制应用	14
3.4 质子交换膜燃料电池的状态空间动态模型	16
3.5 质子交换膜燃料电池的电化学电路模型	20
3.5.1 等效电路	20
3.5.2 模拟结果	22
3.6 质子交换膜燃料电池的线性动态模型	23
3.6.1 Chiu 等人的模型	23
3.6.1.1 燃料电池的小信号模型	24
3.6.1.2 仿真和测量结果的比较	29
3.6.2 Page 等人的模型	31
3.6.3 南阿拉巴马大学的模型	31
3.6.4 其他模型	32
3.7 燃料电池输出响应的参数敏感性	32
3.7.1 燃料电池的动态响应及敏感性分析	33
3.7.1.1 敏感性函数	33
3.7.1.2 敏感性函数图	34
3.7.2 小结	42
参考文献	42
第4章 燃料电池的线性和非线性控制设计	45
4.1 简介	45
4.2 燃料电池的线性控制设计	45
4.2.1 燃料电池的分布参数模型	45
4.2.2 燃料电池的线性控制设计和模拟	46
4.2.2.1 功率控制回路	46
4.2.2.2 功率和固体温度的控制回路	47
4.2.2.3 多输入输出的控制方案	48
4.2.2.4 比例控制	50
4.3 燃料电池的非线性控制设计	52
4.4 接口的非线性控制设计	56
4.5 控制设计分析	59
4.6 质子交换膜燃料电池非线性控制的模拟	62
参考文献	69

第 5 章 在 Simulink 中实现燃料电池模型和控制器	71
5.1 简介	71
5.2 在 Simulink 中实现燃料电池模型	71
5.3 在 Simulink 中实现燃料电池控制器	77
5.4 模拟结果	78
参考文献	84
第 6 章 燃料电池在汽车中的应用	85
6.1 简介	85
6.2 燃料电池汽车的部件	86
6.2.1 燃料电池和燃料电池子系统	86
6.2.1.1 气体流动管理子系统	86
6.2.1.2 水管理子系统	86
6.2.1.3 热管理子系统	86
6.2.2 氢气储存和燃料处理器	89
6.2.3 电驱动子系统	90
6.3 混合动力汽车和电力汽车的燃料电池系统设计	91
6.3.1 串联混合动力汽车	91
6.3.2 平行混合动力汽车	92
6.3.3 串联-并联混合动力汽车	93
6.3.4 燃料电池汽车	94
6.3.4.1 燃料电池汽车的功率管理系统	95
6.3.4.2 燃料电池汽车的电动机和电动机控制器/逆变器	96
6.3.4.3 燃料电池汽车中的辅助系统	98
6.4 用于电力汽车的混合燃料电池系统控制	99
6.4.1 动力传动控制	99
6.4.2 功率控制	99
6.4.3 燃料电池控制	100
6.4.4 燃料处理器或转化器	101
6.5 混合燃料电池系统的故障诊断	102
6.5.1 燃料电池堆	102
6.5.2 氢气供应系统	102
6.5.3 空气、加湿器和水管理系统	103
6.5.4 氢气扩散和冷却系统	103
6.5.5 安全电子系统	103
参考文献	104

第7章 燃料电池在公用电力系统和独立系统中的应用	106
7.1 简介	106
7.2 公用电力系统和住宅应用	106
7.2.1 燃料电池分布式发电系统的模拟和控制	108
7.2.1.1 质子交换膜燃料电池模拟	108
7.2.1.2 等效电路	109
7.2.1.3 热动力学的能量平衡	109
7.2.1.4 质子交换/电解质膜燃料电池的控制设计	109
7.2.2 操作方案	110
7.3 独立的应用	112
7.3.1 燃料电池与超级电容组的动态模拟	112
7.3.1.1 燃料电池模拟	112
7.3.1.2 超级电容组的模拟	114
7.3.2 燃料电池和超级电容组组合的控制设计	114
7.3.3 独立燃料电池系统的主动和被动控制	116
参考文献	116
第8章 混合可再生能源系统的控制和分析	117
8.1 简介	117
8.1.1 风能	117
8.1.2 混合能源	118
8.1.3 燃料电池能源	118
8.2 包括燃料电池和风能的混合系统	119
8.2.1 混合系统的仿真组件和方程	119
8.2.1.1 风力涡轮机子系统	120
8.2.1.2 直流发电机子系统	121
8.2.1.3 风力涡轮机和直流发电机控制器	122
8.2.1.4 质子交换膜燃料电池子系统	123
8.2.1.5 燃料电池控制器	125
8.2.1.6 电解槽子系统	125
8.2.1.7 等效负载和系统互联	125
8.2.2 模拟结果	126
8.2.2.1 低于额定风速 (风能 > 负载)	126
8.2.2.2 高于额定风速 (风能 > 负载)	127
8.2.2.3 低于额定风速 (风能 < 负载)	128
8.2.2.4 湍流风低于额定风速 (风能 < 负载)	129
8.2.3 结论	131

8.3 混合可再生发电系统在孤岛上的应用	132
8.3.1 仿真模型	132
8.3.2 控制方法	132
8.3.3 模拟结果	134
8.3.4 备注和讨论	144
8.4 一个独立风电/光伏/燃料电池发电系统的功率管理	144
8.4.1 系统配置	145
8.4.2 功率管理方案	146
8.4.3 模拟结果	146
8.4.4 小结	153
8.5 混合可再生能源系统的负载流量分析	154
8.5.1 配电系统的负载流量分析	154
8.5.2 在负载流量分析中的分布式发电机建模	156
8.5.2.1 分布式发电机的几个模型	157
8.5.2.2 测试结果	159
8.5.2.3 小结	163
参考文献	163
附录	166
附录 A 线性控制	166
A.1 简介	166
A.2 线性系统与控制	166
附录 B 非线性控制	169
B.1 非线性坐标变换和微分同胚映射	169
B.2 局部微分同胚映射	170
B.3 非线性控制系统的坐标变换	170
B.4 仿射非线性控制系统	171
B.5 向量场的导出映射	171
B.6 李导数和李括号	171
B.7 向量场集的对合性	172
B.8 一个控制系统的相关度	173
B.9 精确线性化控制	173
附录 C 燃料电池汽车应用的感应式电动机建模和向量控制	175
C.1 感应式电动机的电压方程	175
C.2 在固定参照系中的电压方程	176
C.3 在同步参考系中的电压方程	177
C.4 $d-q$ 等效电路	178
C.5 状态空间形式的动态感应式电动机模型	179

C. 6	转矩方程	180
C. 7	转差率计算	182
C. 8	在 d -轴转子磁通 λ_d^e 的计算	182
C. 9	转矩的计算	182
C. 10	d - q 解耦控制与反电动势补偿控制	183
附录 D	坐标变换	183
D. 1	从 abc 相到 $qd0$ 参考坐标系的变换	183
D. 2	同步参考坐标系	184
D. 3	静止参考坐标系	185
D. 4	同步和静止坐标系之间的变换	186
附录 E	空间向量脉宽调制	186
参考文献		190

第 1 章 简 介

1.1 燃料电池的历史、现状和未来

1.1.1 什么是燃料电池？

燃料电池就像普通电池一样地工作，把化学能转换成电能，但它又不同于普通电池。如图 1-1 所示，它借助燃料（如氢气）和氧化剂（如氧气）可持续产生直流电（同时也产生水和热量）。在 20 世纪 60 年代，美国研制出了第一个可实际应用的燃料电池，并在“双子星”和“阿波罗”空间计划中使用。从那时起，虽然从商业化的角度来看这仍是个“新”技术，但燃料电池已经被越来越多地用于陆地。随着一些根本障碍被克服，燃料电池对于某些应用已经更可行，而且被逐步开发和商业化。

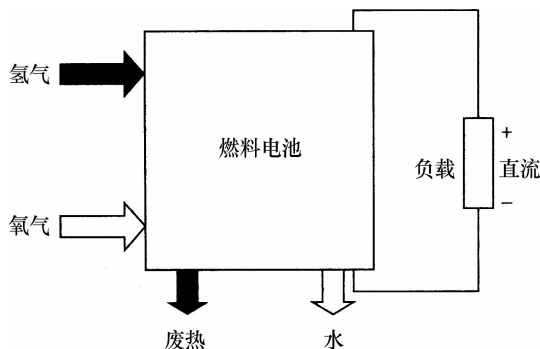


图 1-1 一个燃料电池的输入和输出

举例来说，1993 年 Ballard Power Systems 公司演示了燃料电池公共汽车。之后，所有主要汽车制造商在 20 世纪 90 年代末和 21 世纪初都开发了燃料电池汽车的样车，并且正在美国、日本和欧洲进行测试。在固定式电力方面的应用，现在已经在全球范围的医院、办公楼和公用电厂等地安装了 2 500 多个固定燃料电池电力系统。2005 年，三星电子公司还推出了便携式应用的燃料电池样品，可以驱动笔记本电脑工作约 15h。尽管如此，燃料电池的商业化仍面临许多挑战，其中最重要的问题是降低成本并提高运行的可靠性。

最近燃料电池的开发和商业化动力日益增强，是因为它有以下几个优点：“清洁”的副产品（例如使用纯氢气会生成水），这意味着“零排放”，如果有排放，也是极少的氮氧化合物和硫氧化合物。即使用额外的燃料处理和供给设备，由于没有任何移动部件，它们仍然能安静地工作。再者，它们有很高的能量密度和效率，发电效率一般超过 40%，比传统的内燃发动机/发电机更好。而且从燃料电池来的废热可以用于加热目的，因此增加了整体的效率。最后，它们能增加国家能源安全性，因为不同的燃料电池可以使用各种常规和可替代燃料，如氢气、甲醇、乙醇和天然气。而氢气本身可以通过提炼各种不同的可再生能源来得到，这样可以帮助国

家减少对外国石油的依赖。

1.1.2 燃料电池的种类

燃料电池通常根据所使用的电解质种类来分类。它们包括：质子交换/聚合物电解质膜燃料电池（Proton Exchange/Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, PEM-FCs），直接甲醇燃料电池（Direct Methanol Fuel Cells, DMFC），碱性燃料电池（Alkaline Fuel Cells, AFC），磷酸燃料电池（Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC），熔融碳酸盐燃料电池（Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC），固体氧化物燃料电池（Solid Oxide Fuel Cells, SOFC），锌空气燃料电池（Zinc Air Fuel Cells, ZAFC）和光子陶瓷燃料电池（Photonic Ceramic Fuel Cells, PCFCs）。它们需要的工作温度也各不相同。本书将集中介绍质子交换膜燃料电池，这种电池只需要在低温下工作。主要的汽车生产商都在研发这种电池，因为它适用于大规模燃料电池汽车的生产。这种电池也适用于办公室和居民应用。

1.2 燃料电池系统的典型组织结构

一个燃料电池发电系统的最基本组成包括燃料电池（最常见的是一个电池堆或多层连接的燃料电池）、燃料和氧化剂的供给、电负载和电力调节器（见图 1-2）。燃料和氧化剂供给及电力调节器通常与配套设备放在一起。配套设备包括燃料转化器、热管理子系统和加湿子系统。

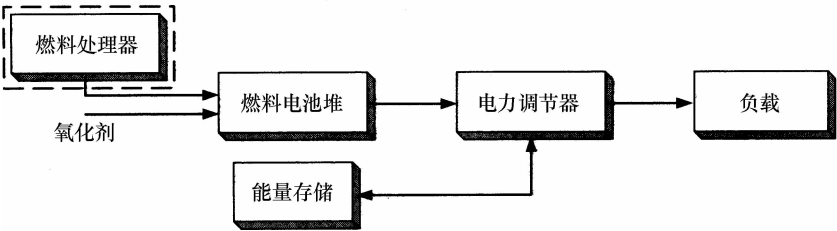


图 1-2 燃料电池发电系统的互联框图

1.3 燃料电池动力学的重要性

为了使燃料电池汽车能够成功地商业化，需要考虑它的性能、可靠性、耐久性、成本、燃料供应和价格，以及公众的接受程度^[1]。燃料电池现在最大的缺点是成本高，而燃料电池系统的瞬态变化性能是另一个关键因素。因为在瞬态，为了产生可靠有效率的功率响应，并且防止电解质膜损伤以及燃料电池堆有害的电压老化和氧气耗尽，必须设计更好的控制方案，以达到最佳的空气和氢气入口流率。也就是说，燃料电池控制系统可以根据燃料电池的电流，精确地进行空气和氢气压力

调节以及热/水管理^[2,3]。

本书将从本质上解决燃料电池对瞬态负载变化响应慢的问题。这是一个很重要的问题，因为燃料电池的动态表现与燃料电池发电系统的整体稳定性和性能是不可分割的。燃料电池发电系统包括燃料供应、燃料电池堆、功率调节和电负载。目前，燃料电池的瞬态（动态）响应要比与它们连在一起的标准功率调节器和负载慢很多。燃料电池因为无法迅速改变电力输出（电流）来应对电负载变化，所以对发电系统的整体设计产生了重大影响。特别是在电负载增加时，如果燃料流率不能维持在恒定的最高水平（这也是浪费和低效率的），需要使用一些能快速充电/放电的能源存储装置作为可靠的备用电源。燃料电池的反应越慢，需要的能源储存装置越大、越重、越贵。同时也减少了可选择的能源存储装置（超级电容、调速轮、电池等等）。因此，燃料电池的动态响应，特别是在移动应用中是极为重要的。

1.4 本书的组织结构

第 2 章更详细地介绍了质子交换膜燃料电池（PEMFCs）和燃料电池发电系统配套设备组件。第 3 章介绍了燃料电池的动态模型，这是为以后设计控制器来改善瞬态性能的第一步。第 4 章介绍了质子交换膜燃料电池控制设计的几种方法。第 5 章主要讲述了燃料电池模型和控制器在 Simulink[®] 中的仿真实现。第 6 章、第 7 章和第 8 章讨论了动态响应都极为重要的三个燃料电池的重要应用：汽车、固定电压独立和混合发电系统。为了使读者更完整地了解这本书，我们还增加了几个附录来简要温习一些相关的主题，例如线性和非线性反馈控制。

参 考 文 献

1. F. Barbir and T. Gomez, Efficiency and economics of PEM fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 22(10/11), 1027–1037, 1997.
2. A.M. Borbely and J.G. Kreider, *Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium*, New York: CRC Press, 2001.
3. F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, New York: Elsevier Academic Press, 2005.

第 2 章 燃料电池的原理

2.1 简介

质子交换膜燃料电池，也称为固体聚合物电解质燃料电池，最早是由美国通用电气公司在 20 世纪 60 年代开发的，为了用在美国航天局第一个载人航天器上^[1]。这种类型的燃料电池主要依赖于一种特殊的聚合物膜，在它表面涂有高度分散的催化剂颗粒。如图 2-1 所示，氢气被输送到膜的阳极一侧（可能高于大气压力），在那里催化剂使氢原子释放它们的电子，成为氢离子 H^+ （质子）：



质子交换膜（Proton Exchange Membrane, PEM）只允许离子 H^+ 穿过它，而电子被外部电路收集，形成可使用的电流（做有效功），然后再到达阴极。在阴极那里，电子与扩散通过交换膜的氢离子和氧气（通常来自于空气）结合起来，形成水。在这个反应中，能量以热的形式释放出来：

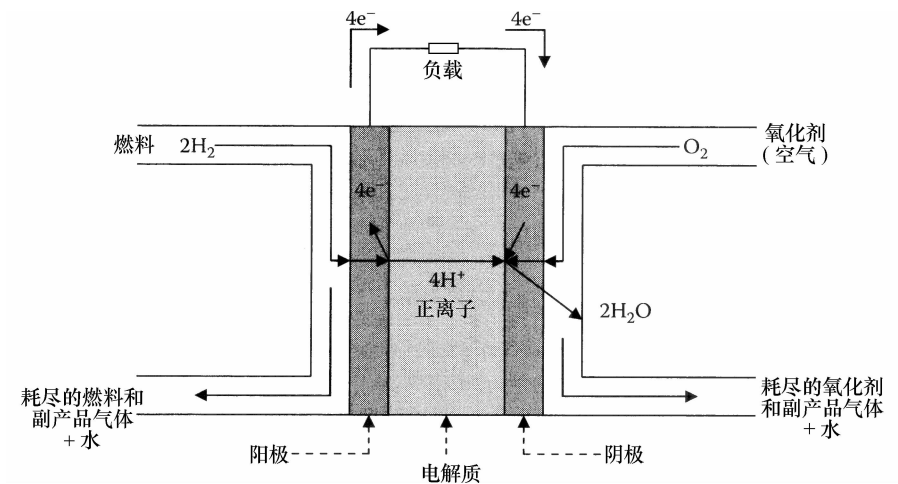


图 2-1 在质子交换膜燃料电池里的电化学反应

注:出自 Na, W. *Dynamic modeling, control and optimization of PEM fuel cell system for automotive and power system applications*, PhD thesis, The University of Texas at Arlington, 2008. 许可使用。

水这种反应副产品必须被清除，以防止电池被水淹没而无法正常工作（更多细节以后再谈）。此外，任何未使用的氢气和氧气（空气）都分别通过电池阳极和阴极出口排放出去，如图 2-1 所示。为了使这种反应能持续进行下去，在阳极产生的电子必须通过燃料电池的一个外部电路流动，而质子必须通过质子交换膜流动。

单个燃料电池反应产生约 0.7 V 的输出电压。一般的应用需要把几个电池串联起来，形成一个燃料电池堆，彼此电压相加得到所需的电压。质子交换膜燃料电池所需的工作温度只有 50 ~ 100℃，它能够快速启动工作。因此，这种燃料电池对运输应用特别有吸引力。因其高功率密度、固体电解质、电池“堆”寿命长和低腐蚀，它也可以用做小型或中型分布式发电机。其他的优势还包括清洁的副产品（当用氢气做燃料时得到纯净水，这意味着“零排放”），通常超过 40% 的发电效率和能安静地工作^[3]。因此，质子交换膜燃料电池可以为以下用途供电：汽车、飞机（做辅助电源）、家庭和小型办公室，以及便携式电子设备（作为充电电池的替换件）。

2.2 质子交换膜燃料电池的组件

图 2-2 所示为一个实际质子交换膜燃料电池的组成部分。其中的膜电极组（Membrane Electrode Assembly, MEA）包括聚合物膜、电极和气体扩散层。每个电极基本上都有一层催化剂粒子（通常是铂金沉积在碳载体粉大颗粒的表面），贴在膜上或贴在气体扩散层上。气体扩散层由一种多孔、导电材料组成，如碳布，它能使反应物扩散入或扩散出膜电极组，而且提供电极与外部双极板的电接点来收集所产生的电流。此外，它允许阴极产生的水离开气体通道。

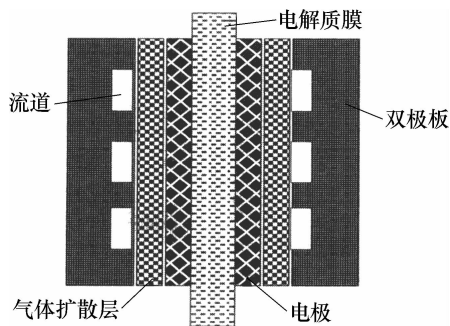


图 2-2 质子交换膜燃料电池的主要功能部件

双极板也称为流场板，通过它们表面的流动渠道能将反应气体扩散到电极的表面。双极板有不同的通道几何形状可供选择。它们还能收集电流并且起到燃料电池的结构支撑作用。这些双极板通常用固体石墨作板材料，因为它有良好的导电和导热性及力学强度和化学稳定性。

我们将在以下的各节进一步讨论质子交换膜燃料电池的组成和各部分的功能。

2.2.1 电解质膜

电解质膜是任何质子交换膜燃料电池中的关键部分。因为用质子导电聚合物做

电解质，所以才这样为这种燃料电池命名。组成这种膜的基本材料是聚乙烯，其中的氢被氟取代形成聚四氟乙烯。氟和碳之间的化学键使膜非常耐用，并且抗化学反应（呈惰性）。然后，基本的电解质再辅加以亚硫酸，其中添加的 HSO_3 依靠离子键结合（见图 2-3）。其结果是能够把 H^+ 离子吸引到电解质中。这种材料是由杜邦公司制造的，以 Nafion[®] 商标名称销售，它对质子交换膜燃料电池的发展一直非常重要。

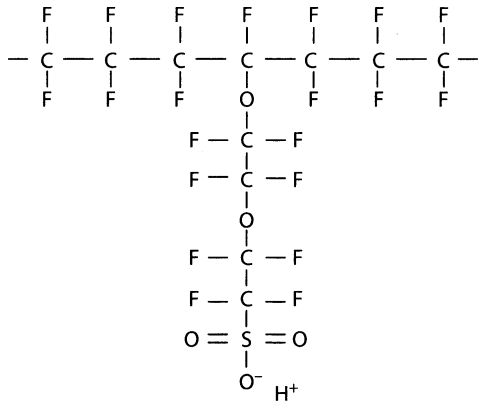


图 2-3 聚四氟乙烯的结构

- 这种聚合物膜的主要性能^[3]如下：
- 能抗化学反应。
 - 有很强的化学键，因此它们可以制成极薄的膜。
 - 呈酸性。
 - 可以吸收大量的水。
 - 如果膜含有充足的水分（但没有被淹没），它们所吸引的 H^+ 离子就可以很好地通过膜。

2.2.2 膜电极组

质子交换膜燃料电池的性能在很大程度上取决于膜电极组，因为这是燃料电池的核心部分。图 2-4 所示是膜电极组。电解质膜被夹在阳极和阴极电极之间。电极包括催化剂颗粒和气体扩散层。

由于燃料的氧化和氧化还原反应动力学缓慢，需要使用一种贵金属（如铂或其合金）作为催化剂来提高反应速度，这种催化剂在阳极和阴极同时使用。铂被制成小颗粒扩散到碳载体的表面。最常见的碳载体是一种碳基的粉末 XC72[®]（Cabot）。为了增加与反应物的接触面积以尽量扩大其催化效果，扩散到碳载体上的铂是高度分散的。在燃料电池开发的初期，这种催化剂每平方厘米需要大约 50mg 铂 [4]，但现在已减少到每平方厘米不足 1mg 铂 [5]，这大大降低了燃料电池的整体成本。

催化剂颗粒和碳载体是贴在多孔的气体扩散层上，这个层由导电材料制成，如碳布或碳纸。这种碳布或碳纸能把反应物气体扩散到催化剂颗粒表面，同时把在阴极产生的水扩散远离电解质膜。此外，它还提供了电极与其相应的导电双极板之间的电连接。

2.2.3 双极板

双极板（也称为流场板）是构成质子交换膜燃料电池重量和体积的主要部分。它们被用来把反应物通过机加工的通道（沟）运送到膜电极组，也帮助将反应物

扩散到电极的表面。此外，它们还收集由电化学反应产生的电流。双极板需要有良好的导电性和导热性，良好的力学强度和化学稳定性。目前石墨是最常用的材料。现在也有大量开发新材料的研究，其目的是减轻双极板的重量，从而提高燃料电池的功率密度。

我们要非常注意的是，流道几何形状根据每个燃料电池的需要和设计而各不相同。具体几何形状对燃料电池的性能也至关重要。图 2-5 所示是双极板用的不同几何形状。

2.2.4 加热或冷却板

加热或冷却板可用于加热或冷却燃料电池，以保持其温度接近最佳工作性能温度。加热板通常使用欧姆（电阻）热，当空气冷却不足时才使用冷却板，靠着液体（例如水）循环来冷却电池堆。

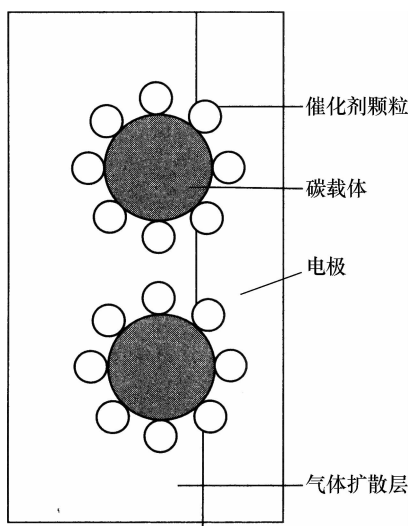


图 2-4 膜电极组

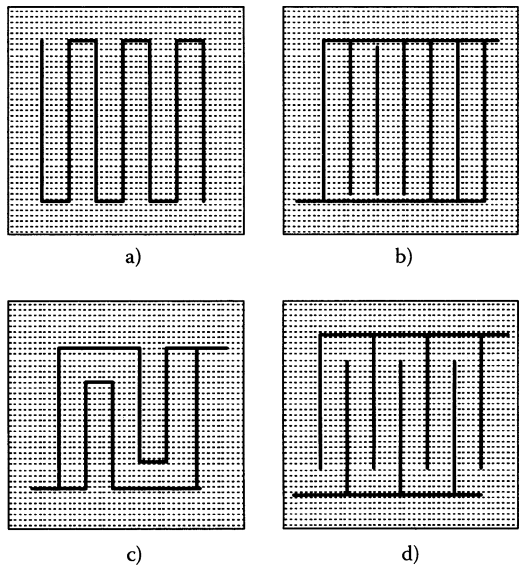


图 2-5 不同几何形状的流道

a) 蛇形 b) 平行形 c) 平行蛇形 d) 不连续形

2.3 配套设备的组件

实际的燃料电池堆可以从有调节阀的压力罐得到氢气，也可以通过处理器加工像天然气这样的富氢燃料间接地得到氢气。以上需要操作燃料电池堆的额外设备统称为配套设备。它们帮助燃料的储存和处理、水管理和热管理，以及功率调节，来达到燃料电池系统的设计要求。因为它们不是本书的重点，所以下面只是简单介绍一下这些设备。

2.3.1 水管理

如果没有足够好的水管理，将出现燃料电池水产生和水去除的不平衡。确保电池的各个部分都有足够的水是至关重要的，否则如果发生脱水，膜和电极之间的粘性及膜的寿命都将受到不利的影响。此外，在电解质膜中高的水含量能确保高的离子电导率，这会提高燃料电池整体运行的效率。因为电化学反应产生热量，从而增加了水蒸发，所以需要使用加湿器来（预）加湿传入的气体，这在阳极侧尤为重要。加湿器可以用简单的起泡器，或者用更高级的膜加湿器和水蒸发器^[4]。

由于质子交换膜燃料电池的工作温度不到 100℃，而且可以在大气压力下工作，所以在阴极会有液体水产生。虽然足够的水对于燃料电池的最佳运行非常重要，但是也必须保证不让水淹没电极，否则会妨碍气体扩散到电极，降低电池的工作性能。

2.3.2 热管理

目前使用的大多数质子交换膜燃料电池用碳复合板来收集传导电流、分配气体并管理热。可以用风扇来实现主动空气冷却，也可以用水泵循环电池堆冷却板里的流体来实现液体冷却。通常用电动机来驱动风扇和水泵。

2.3.3 燃料储存和加工

目前，质子交换膜燃料电池最常见的氢储存方法是用加压的圆筒或罐子来储存氢气。这些储存装置必须有减压的调节阀。储存液态氢“只”要求适当地绝热，但与储存和运输氢气相比，其效率还是很低。

另一种使用氢作为主要燃料的方法是从碳氢化合物或酒精化合物中提取氢。但这样就需要用燃料处理器或转化器通过化学方法把碳氢化合物或酒精转化成富氢的气体。此外，因为质子交换膜和转化器的催化剂易受硫和一氧化碳（也在较小程度上受二氧化碳）的影响而失去活性，所以需要其他子系统从燃料中除掉硫，从富氢重整品中除掉一氧化碳。这些不同的组件都增加了整个系统的重量、体积和费用，并降低了效率。

2.3.4 功率调节

功率调节器是一个电子系统。它可以根据应用的具体需要，把燃料电池的低电压直流电转换成可使用的直流电（通常为较高的电压）或交流电。在燃料电池功率调节系统中，可以使用很多不同类型的电转换器，如直流-直流转换器和直流-交流逆变器。

直流负载供电通常使用升压直流-直流转换器（来提高电压）。另一方面，通常使用开关模式的直流-交流逆变器将燃料电池输出的直流电压转换成额定频率 60Hz（或其他）的交流电压。逆变器的输出要用滤波器来衰减开关频率谐波，好为标准的交流负载提供高品质的正弦交流电压。

对于许多重要的应用，需要电池有 5:1 或更好的峰值-平均功率比，例如驱动

汽车，要满足加速和匀速行驶所需的功率比^[4]。由于现在的燃料电池输出功率通常不能随着负载需求的变化而迅速改变，所以设计只是满足平均功耗的要求，然后由另一个能量储存装置，如电池或超级电容，来供应额外的功率需求。因此，功率调节器必须提供与这个能量存储装置的接口，还需要有控制方案，根据燃料电池输出和负载需求状况协调充电或放电。

参 考 文 献

1. *Fuel Cell Handbook*, 7th ed., Morgantown, WV: EG&G Technical Services, Inc., for U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, November 2004.
2. W. Na, Dynamic modeling, control and optimization of PEM fuel cell system for automotive and power system applications, PhD thesis, The University of Texas at Arlington, May 2008.
3. J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd ed., Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2003.
4. G. Hoogers (ed.), *Fuel Cell Technology Handbook*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2003.
5. H.A. Gasteiger, J.E. Panels, and S.G. Yan, Dependence of PEM fuel cell performance on catalyst loading, *Journal of Power Sources*, 127, 162–171, 2004.

第 3 章 燃料电池的线性和非线性动态模型

3.1 简介

为了能够对燃料电池发电系统进行初步规划、稳定性分析以及控制方案的合成和评估，需要有一个合适的燃料电池系统动态模型。由于现有的以控制为主的模型^[1-3]不包含水这个燃料电池的重要成分，我们很难根据它们设计一个准确的动态燃料电池模型^[4]。研发燃料电池动态模型主要是为了方便控制方案设计。而控制设计是通过控制阳极和阴极气体压力来确保良好的负载跟踪性能，以防止破坏燃料电池堆，并延长电池堆寿命。在这一章中，我们会介绍燃料电池的各种模型。在第 5 章，我们将利用这些燃料电池模型来设计合适的燃料电池系统控制器。

3.2 符号命名

E_0	在标准压力下的电池开路电压
N	电池堆中的电池数
E	燃料电池（堆）的输出电压
L	总的电池电压损失
i	电池输出电流密度
i_n	与内部电流损耗相对应的电池内部电流密度
i_o	与激活损耗相对应的电池交换电流密度
i_l	与浓度损耗相对应的电池限制电流密度
r	与电阻损耗相对应的电池面积比电阻
a	与电池激活损耗有关的常数（塔菲尔 Tafel 线的斜率）
b	与电池浓度损耗有关的常数
T	电池堆工作温度
P_{H_2}	电池阳极内的氢气分压
P_{O_2}	电池阴极内的氧气分压
$P_{H_2O_A}$	电池阳极内的水蒸气分压
$P_{H_2O_C}$	电池阴极内的水蒸气分压
P_{N_2}	电池阴极内的氮气分压
$P_{cathode}$	电池阴极内的气体分压总和

R	通用气体常数 $[8.3144\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$
F	法拉第常数 $(96\,439\text{C}/\text{mol})$
P_{std}	标准压力 $(101\,325\text{Pa})$
P_{op}	假设的恒定电池工作压力
$H_{2\text{in}}, H_2O_{\text{Ain}}$	阳极入口的氢气和水蒸气的摩尔流率
Anode_{in}	阳极入口的摩尔流率总和
$O_{2\text{in}}, N_{2\text{in}}, H_2O_{\text{Cin}}$	阴极入口的氧气、氮气和水蒸气的摩尔流率
Cath_{in}	阴极入口的摩尔流率总和
$H_{2\text{out}}, H_2O_{\text{Aout}}$	阳极出口的氢气和水蒸气的摩尔流率
$O_{2\text{out}}, N_{2\text{out}}, H_2O_{\text{Cout}}$	阴极出口的氧气、氮气和水蒸气的摩尔流率
$H_{2\text{used}}, O_{2\text{used}}, H_2O_{\text{Cproduced}}$	氢气、氧气和水蒸气（在阴极）的摩尔使用率和产生率
I	电池的输出电流
A_{c}	电池的有效面积
V_{A}	电池阳极通道的体积
V_{C}	电池阴极通道的体积
$F_{H_2}, F_{O_2}, F_{H_2O_{\text{C}}}$	在燃料电池内的氢气、氧气和水蒸气（阴极内）的分压
γ_{H_2}	阳极入口的氢气摩尔分数
γ_{O_2}	阴极入口的氧气摩尔分数
$\gamma_{H_2O_{\text{C}}}$	阴极入口的水蒸气摩尔分数
$\Delta P_{H_2}, \Delta P_{O_2}, \Delta P_{H_2O_{\text{C}}}$	电池内部氢气、氧气和水蒸气（阴极内）分压的小波动
$\Delta H_{2\text{in}}, \Delta O_{2\text{in}}, \Delta H_2O_{\text{Cin}}$	入口氢气、氧气和水蒸气（到阴极）流率的小波动
Δi	输出电流密度的小波动
ΔE	燃料电池堆输出电压的小波动

3.3 质子交换膜燃料电池的非线性动态模型

3.3.1 稳态和动态电压-电流特性的统一模型

极化曲线可以用来表达燃料电池的性能，它描述了电池电压-负载电流（V-I）高度非线性的特点^[1-9]。燃料电池的工作点、功率调节的设计、燃料电池堆系统模拟器的设计和系统控制器的设计都依赖于这样的特性曲线^[10]。因此，为燃料电池电压-电流特性建模是非常重要的。

我们可以看到，电化学模拟计算的有名的稳态电压-电流特性分为两部分：一部分称为稳态分量，包括热力学势和欧姆过电压，另一部分称为瞬态分量，包括激

活和浓度过电压。此外,前者可以由低阶最小二乘多项式拟合,而后者则可以由高阶最小二乘多项式拟合(多项式的系数可以用最小二乘法来估算)。可用这两个分量的和来精确模拟质子交换膜燃料电池的稳态电压-电流特性。此外,通过引入一阶时间延迟来描述质子交换膜燃料电池的动态响应,我们推导的数学模型也可用于准确预测动态的电压-电流特性。

以下公式决定了质子交换膜燃料电池的稳态电压-电流特性^[1,4,5]:

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{N}} - V_{\text{a}} - V_{\text{c}} - V_{\text{ohm}} = V_{\text{st}} - V_{\text{tr}}$$

式中 V_{cell} ——燃料电池的输出电压;
 E_{N} ——燃料电池的可逆电压(也称为热力学势);
 V_{a} ——阳极和阴极的激活电压降(也称为激活过电压);
 V_{c} ——反应物中气体浓度下降或氧气和氢气的质量传送引发的电压降(也称为浓度过电压);
 V_{ohm} ——质子通过固体电解质传导的电阻和电子通过电路传导的电阻引起的欧姆电压降(也称为欧姆过电压);
 $V_{\text{st}} = E_{\text{N}} - V_{\text{ohm}}$ ——电池电压的稳态分量;
 $V_{\text{tr}} = V_{\text{a}} + V_{\text{c}}$ ——电池电压的瞬态分量。

稳态和动态燃料电池电压-电流特性的统一数学模型是

$$v_{\text{cell}}(t) = \sum_{k=0}^2 p_k (I_{\text{cell}} - I_{\text{st}})^k - \sum_{k=0}^5 q_k (I_{\text{cell}} - I_{\text{tr}})^k - \left[\sum_{k=0}^5 q_k (I_{\text{cell}} - I_{\text{tr}})^k - (I_{\text{cell}} - I_{\text{tr}})^k \right] (1 - e^{-t/T_{\text{C}}})$$

式中

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^2 p_k (I_{\text{cell}} - I_{\text{st}})^k &= V_{\text{st}}(I_{\text{cell}}) \\ I_{\text{st}} &= \sum_{m=0}^{N_{\text{st}}-1} \frac{I_{\text{cell}m}}{N_{\text{st}}} \\ \sum_{k=0}^5 q_k (I_{\text{cell}} - I_{\text{tr}})^k &= V_{\text{tr}}(I_{\text{cell}}) \\ I_{\text{tr}} &= \sum_{m=0}^{N_{\text{tr}}-1} \frac{I_{\text{cell}m}}{N_{\text{tr}}} \end{aligned}$$

I_{cell} ——电池电流;

p_k ——利用最小二乘法确定的系数;

$I_{\text{cell}m}$ ——已知的离散电流值;

N_{st} ——稳态分量已知的离散电流数据数目 ($N_{\text{st}} \geq 3$);

q_k ——用最小二乘法确定的系数;

N_{tr} ——瞬态分量已知的离散电流数据数目 ($N_{\text{tr}} \geq 6$)。

3.3.2 模拟结果

我们用 Ballard Mark V 质子交换膜燃料电池测试所提出的模型见图 3-1 和图 3-2。表 3-1 和表 3-2 分别列出了稳态和瞬态分量多项式的计算系数。我们根据电化学模型公式的数据和表 3-3 列出的 Ballard Mark V 质子交换膜燃料电池参数，用最小二乘法计算了这些系数。

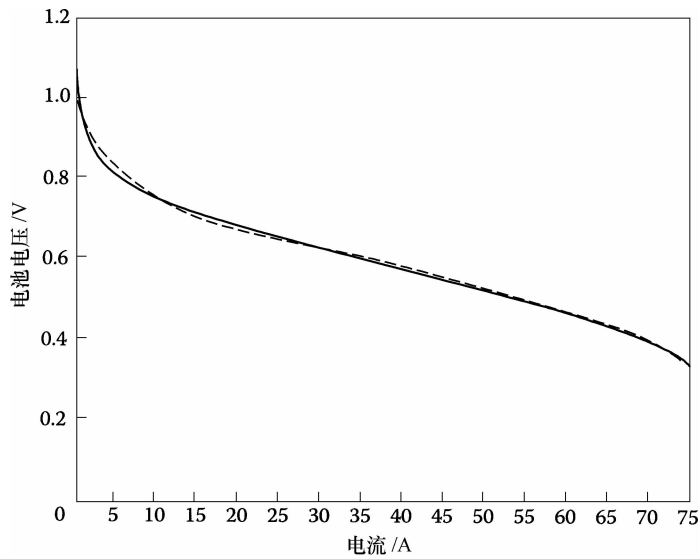


图 3-1 计算和给出的 Ballard Mark V 质子交换膜燃料电池稳态电压-电流特性曲线
虚线为计算出的数据，实线为给出的数据

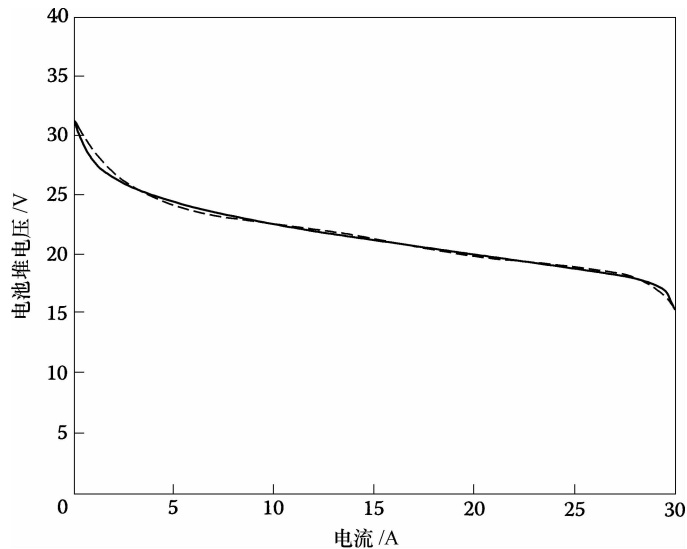


图 3-2 电池堆的极化电压-电流曲线
(Ballard Mark V 燃料电池于 70℃)

表 3-1 Ballard Mark V 质子交换膜燃料电池稳态系数

k	0	1	2
p_k	0.110149E+01	-0.297366E-02	-0.183457E-04

表 3-2 Ballard Mark V 质子交换膜燃料电池瞬态系数

k	0	1	2	3	4	5
q_k	0.516228E+00	0.298822E-02	0.265448E-04	-0.323092E-05	-0.603896E-07	0.349527E-08

(出自: Larminie, J. and Dicks, A., *Fuel Cell Systems Explained*, Wiley, New York, 2002. 许可使用)

表 3-3 Ballard Mark V 质子交换膜燃料电池的电压参数

参数	参数值和定义	参数	参数值和定义
N	电池数:35	M	质量转移电压常数: $2.11 \times 10^{-5} \text{ V}$
V_o	开路电池电压:1.032V	N	质量转移电压常数: $8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{mA}$
R	通用气体常数: $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	R_{ohm}	$2.45 \times 10^{-4} \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$
T	燃料电池温度:353K	A_{fc}	燃料电池有效面积: 232 cm^2
F	法拉第常数: 96485 C/mol	I_o	交换电流密度(A/cm^2)
α	电荷转移常数:0.5	I_n	内部电流密度(A/cm^2)

3.3.3 质子交换膜燃料电池非线性模型的控制应用

如图 3-3 所示，质子交换膜燃料电池有一个聚合物电解质膜夹在两个电极（阳极和阴极）之间。在电解质中，只允许离子通过，不允许电子通过。所以，因为阳极和阴极之间的电位差，电子需要在阳极和阴极之间的外部电路中流动来产生电流。

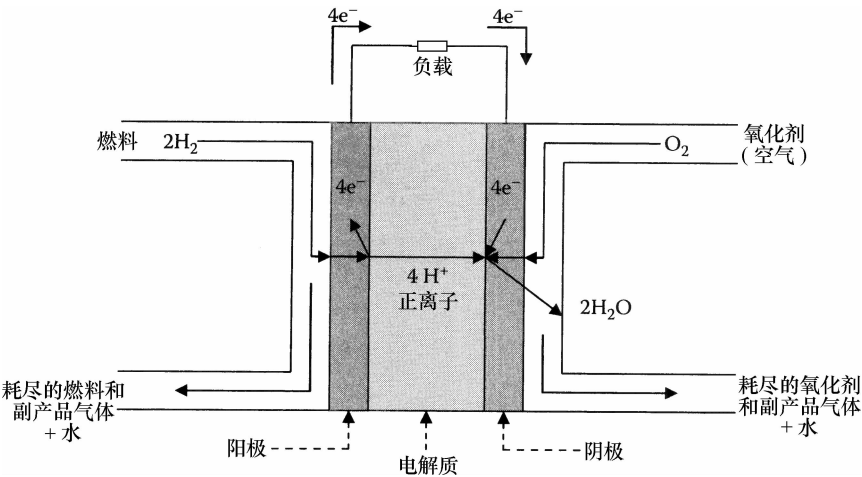
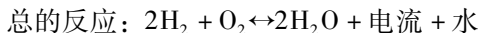
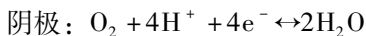
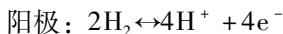


图 3-3 燃料电池的工作原理

质子交换膜燃料电池阳极供应氢气，阴极供应氧气，总电化学反应如下：



在实际应用中，5kW 的 Ballard MK5-E 燃料电池堆，使用 1MPa 的氢气压力罐和大气中的氧气^[11,12]。如果在阳极侧用转化器，把甲烷或天然气等其他燃料转化成氢气，那就可以不用氢气压力罐。

电池堆还需要有压力调节器和氢气清除部件。在阴极侧，为了保持氧气分压，需要有一个空气供应系统，包含压缩机、空气过滤器和空气流率控制器^[2,4,7,13]。在阴极、阳极两侧都需要加湿器，以防止燃料电池膜脱水^[2,4,7]。此外，燃料电池系统的水和热管理可能需要换热器、水箱、水分离器和水泵^[2,4,7]。

为了产生高电压，必须串联起多个电池。通常，根据电池电压与负载电流的极化曲线，一个电池能产生 0 ~ 1V 电压^[2,4,7]。图 3-4 显示，电压和电流的关系是非线性的，而且主要和电流密度、电池温度、反应物分压和膜湿度^[2,4,7] 相关。

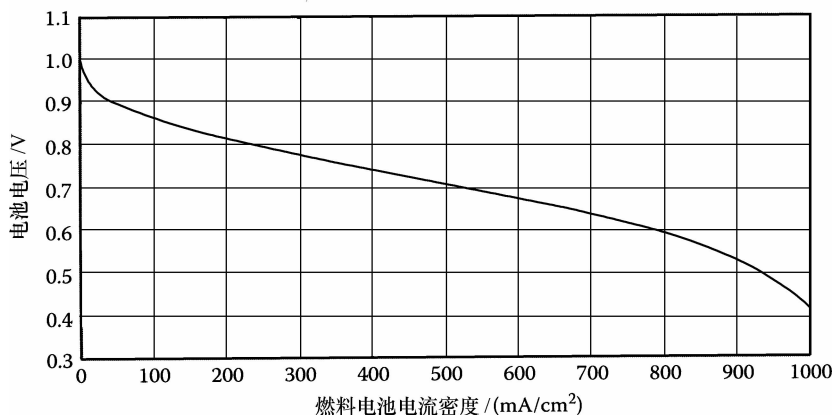


图 3-4 极化的电压-电流曲线 (Ballard Mark V 燃料电池在 70°C)

(出自 Larminie, J. and Dicks, A., *Fuel Cell Systems Explained*, Wiley, New York, 2002. 许可使用)

电池堆输出电压 V_{st} ^[4] 是电池堆电流、反应物分压、燃料电池温度和膜湿度的函数：

$$V_{\text{st}} = E - V_{\text{activation}} - V_{\text{ohmic}} - V_{\text{concentration}} \quad (3-1)$$

式中 $E = N_o \cdot [V_o + (RT/2F) \ln(P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}/P_{H_2O_c})]$ ——电池的热力学势能或是根据 Nernst 方程的可逆电压^[4];

$V_{\text{activation}}$ ——电极表面反应速率的电压损失;

V_{ohmic} ——电解质中质子流的欧姆电阻电压降;

$V_{\text{concentration}}$ ——气体浓度减小或氧气和氢气质量传输导致的电压损失;

它们的方程为:
$$V_{\text{activation}} = N \cdot \frac{RT}{2\alpha F} \cdot \ln\left(\frac{I_{fc} + I_n}{I_o}\right) \quad (3-2)$$

$$V_{\text{ohm}} = N \cdot I_{fc} \cdot R_{\text{ohm}} \quad (3-3)$$

$$V_{\text{concentration}} = N \cdot m \exp(n \cdot I_{fc}) \quad (3-4)$$

P_{H_2} , P_{O_2} 和 $P_{H_2O_c}$ ——氢气、氧气和水的分压; 下标 “c” 是阴极出口水的分压。

3.4 质子交换膜燃料电池的状态空间动态模型

为了推导出一个简化的非线性动态燃料电池模型, 我们做以下假设:

- 由于电池堆温度的动态变化慢, 假定平均电池堆温度是恒定的。
- 可以很好地控制相对湿度略高于 100%, 因此液体水总能生成在电池堆。同时水箱和水分离器完美地控制这些液态水, 可以避免水淹现象。
- 反应物持续供给燃料电池, 使它能在足够高的流率下工作。
- 为了建立燃料电池的简化动态模型, 假定入口反应物的摩尔分数是恒定的。换句话说, 纯氢气 (99.99%) 被直接输入到阳极, 氮气和氧气按 21: 79 的空气比例均匀混合输入到阴极。
- 为了利用线性反馈, 必须测量完全状态^[14]。

我们使用理想气体定律和摩尔守恒定律, 定义氢气、阳极的水、阴极的氧气、氮气和水的分压为燃料电池的状态变量。图 3-5 表示入口气体和出口气体之间的关系^[15]。

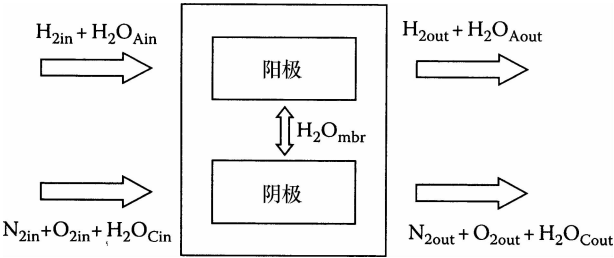


图 3-5 质子交换膜燃料电池的气体流动示意图

下面的公式给出了分压的导数：

阳极摩尔守恒

$$\begin{aligned}\frac{dP_{H_2}}{dt} &= \frac{RT}{V_A} (H_{2in} - H_{2used} - H_{2out}) \\ \frac{dP_{H_2O_A}}{dt} &= \frac{RT}{V_A} (H_2O_{Ain} - H_2O_{Aout} - H_2O_{mbr} + H_2O_{back} - H_2O_{l,Aout})\end{aligned}\quad (3-5a)$$

阴极摩尔守恒

$$\begin{aligned}\frac{dP_{O_2}}{dt} &= \frac{RT}{V_C} (O_{2in} - O_{2used} - O_{2out}) \\ \frac{dP_{N_2}}{dt} &= \frac{RT}{V_C} (N_{2in} - N_{2out}) \\ \frac{dP_{H_2O_C}}{dt} &= \frac{RT}{V_C} (H_2O_{Cin} + H_2O_{Cproduced} - H_2O_{Cout} + H_2O_{mbr} - H_2O_{mbr} - H_2O_{l,Cout})\end{aligned}\quad (3-5b)$$

式中 H_{2in} 、 O_{2in} 、 N_{2in} 、 H_2O_{Ain} 和 H_2O_{Cin} 分别是氢气、氧气、氮气、阳极侧、阴极侧水的入口流率。此外， H_{2out} 、 O_{2out} 、 N_{2out} 、 H_2O_{Aout} 和 H_2O_{Cout} 是每种气体的出口流率。 H_{2used} 、 O_{2used} 和 $H_2O_{Cproduced}$ 分别是气体的使用率和产生率。一般来说，入口水流过膜的流率 H_2O_{mbr} 是电池堆电流和膜含水量 λ_m 的函数。假定 $\lambda_m = 14$ ^[7,16]， H_2O_{mbr} 只是电流密度的函数^[7,16]，并且 $H_2O_{mbr} = 1.2684(N \cdot A_{fc} \cdot I_{fc})/F$ ，其中 A_{fc} (cm^2) 是燃料电池的有效面积， N 是燃料电池的数量， I_{fc} 是燃料电池的电流密度。此外，为了更准确地描述一个动态模型，可以定义水从阴极向阳极的回流为 $H_2O_{v,back} = \gamma \cdot H_2O_{v,mbr}$ ^[2]。当含水量 $\lambda_m = 14$ 时，回流系数 β 的测量值是 6×10^{-6} (cm^2/s)^[2]。液体水离开阳极和阴极的流率是 $H_2O_{l,Aout}$ 和 $H_2O_{l,Cout}$ 。它们取决于每种气体的饱和程度^[7]。为了估计液体水，必须用水蒸气饱和压力来计算水蒸气最大质量，公式如下：

$$m_{v,max,A \text{ or } C} = \frac{p_{vs} V_{A \text{ or } C}}{R_v T_{st}} \quad (3-6)$$

饱和压力 p_{vs} 可以根据文献 [17] 中的一个公式计算：

$$\log_{10}(p_{vs}) = -1.69 \times 10^{-10} T^4 + 3.85 \times 10^{-7} T^3 - 3.39 \times 10^{-4} T^2 + 0.143 T - 20.92 \quad (3-7)$$

式中饱和压力 p_{vs} 的单位是 kPa，温度 T 的单位是 K。如果式 (3-5a) 和式 (3-5b) 中水的质量比式 (3-6) 中最大水蒸气质量大，可以同时形成液体水。液体水和水蒸气质量的计算方法如下^[7]：

逻辑 1

如果 $m_{w,A \text{ or } C} \leq m_{v,\max A \text{ or } C} \rightarrow m_{v,A \text{ or } C} = m_{w,A \text{ or } C}$, $m_{l,A \text{ or } C} = 0$;

如果 $m_{w,A \text{ or } C} > m_{v,\max A \text{ or } C} \rightarrow m_{v,A \text{ or } C} = m_{v,\max A \text{ or } C}$;

$$m_{l,A \text{ or } C} = m_{w,A \text{ or } C} - m_{v,\max A \text{ or } C}$$

因此, $\beta_{A \text{ or } C}$ 可以用来估计在方程 (3-8) 中液态水的形成。根据逻辑 1, 如果 $m_{w,A \text{ or } C} \leq m_{v,\max A \text{ or } C}$, 那么 $\beta_{A \text{ or } C} = 0$; 否则 $\beta_{A \text{ or } C} = 1$, 因此, $H_2O_{l,Aout}$ 和 $H_2O_{l,Cout}$ 定义如下

$$H_2O_{l,A \text{ or } C \text{ out}} = \beta_{A \text{ or } C} \left| \frac{P_{H_2O_{A \text{ or } C \text{ out}}} V_{A \text{ or } C}}{R_v T_{st}} - \frac{P_{vs} V_{A \text{ or } C}}{R_v T_{st}} \right| / M_{H_2O} \quad (3-8)$$

式中 M_{H_2O} 是水的摩尔质量, 为 18.02g/mol。我们定义所有的流率、气体使用率和产生率的单位是 mol/s。然而, 由于我们假设相对湿度都超过 100%, 水是液态的, $\beta_{A \text{ or } C}$ 是 1, 这意味着在模拟中 $p_{H_2O_{A \text{ or } C}} > P_{vs}$ 。 V_A 和 V_C 分别是阳极和阴极的体积, 它们的单位是 m^3 。根据电化学的基本关系, 使用和产生的气体是电池电流密度的函数^[4]:

$$H_{2\text{used}} = 2O_{2\text{used}} = H_2O_{C\text{produced}} = \frac{N \cdot A_{fc} \cdot I_{fc}}{2F} \quad (3-9)$$

为了简化起见, 我们定义

$$\frac{N \cdot A_{fc}}{2F} = C_1 \text{ 并且 } 1.2684 \frac{N \cdot A_{fc}}{F} = C_2$$

因此, 在式 (3-5a) 和式 (3-5b) 中, H_2O_{mbr} 和 $H_2O_{v,back}$ 可以用 C_1 和 C_2 简化。有了实测的入口流率和电池堆电流, 出口流率就是阳极和阴极入口流率 $Anode_{in}$ 和 $Cath_{in}$, 减去气体使用率和产生率以及文献 [13] 中提出的压力分数。 $Anode_{in}$ 的定义是 $H_{2in} + H_2O_{Ain}$, $Cath_{in}$ 的定义是 $O_{2in} + N_{2in} + H_2O_{Cin}$ 。

阳极侧出口流率是

$$\begin{aligned} H_{2out} &= (H_{2in} - C_1 \cdot I_{fc}) F_{H_2} \\ H_2O_{Aout} &= (H_2O_{Ain} - C_2 \cdot I_{fc} + \gamma \cdot C_2 \cdot I_{fc}) F_{H_2O_A} \end{aligned} \quad (3-10)$$

阴极侧出口流率是

$$\begin{aligned} O_{2out} &= \left(O_{2in} - \frac{C_1}{2} I_{fc} \right) F_{O_2} \\ N_{2out} &= N_{2in} \cdot F_{N_2} \\ H_2O_{Cout} &= (H_2O_{Cin} + C_1 \cdot I_{fc} + C_2 \cdot I_{fc} - \gamma \cdot C_2 \cdot I_{fc}) F_{H_2O_C} \end{aligned} \quad (3-11)$$

式中 F_{H_2} , $F_{H_2O_A}$, F_{O_2} , F_{N_2} 和 $F_{H_2O_C}$ 分别是燃料电池内各种气体的压力分数, 给出如下^[18]:

$$F_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P_{H_2} + P_{H_2O_A}}; F_{H_2O_A} = \frac{P_{H_2O_A}}{P_{H_2} + P_{H_2O_A}}; F_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P_{O_2} + P_{N_2} + P_{H_2O_C}};$$

$$F_{N_2} = \frac{P_{N_2}}{P_{O_2} + P_{N_2} + P_{H_2O_C}}; F_{H_2O_C} = \frac{P_{H_2O_C}}{P_{O_2} + P_{N_2} + P_{H_2O_C}} \quad (3-12)$$

为了分析燃料电池的瞬态性能，我们要考虑到 Chiu 等人提出的每种气体的压力分数^[18]。在文献 [18] 中，只考虑到 3 种压力分数 F_{H_2} 、 F_{O_2} 和 $F_{H_2O_C}$ 。但在我们的研究中，考虑到了所有气体的压力分数，因此得到更精确的燃料电池动态模型和比以往研究^[3,7,18,19]更好的燃料电池瞬态特性分析。把式 (3-10) 和式 (3-12) 代入式 (3-5a) 和式 (3-5b)，可以得到状态方程[式(3-13)和式(3-14)]。

阳极侧新的状态方程是

$$\begin{aligned} \frac{dP_{H_2}}{dt} &= \frac{RT}{V_A} [H_{2in} - C_1 \cdot I_{fc} - (H_{2in} - C_1 \cdot I_{fc}) F_{H_2}] \\ \frac{dP_{H_2O_A}}{dt} &= \frac{RT}{V_A} [H_2O_{Ain} - (H_2O_{Ain} - C_2 \cdot I_{fc} + C_2 \cdot I_{fc}) F_{H_2O_A} - C_2 \cdot I_{fc} + \gamma \cdot C_2 \cdot I_{fc}] \end{aligned} \quad (3-13)$$

阴极侧新的状态方程是

$$\begin{aligned} \frac{dP_{O_2}}{dt} &= \frac{RT}{V_C} \left[O_{2in} - \frac{C_1}{2} I_{fc} - \left(O_{2in} - \frac{C_1}{2} I_{fc} \right) F_{O_2} \right] \\ \frac{dP_{N_2}}{dt} &= \frac{RT}{V_C} [N_{2in} - N_{2in} \cdot F_{N_2}] \\ \frac{dP_{H_2O_C}}{dt} &= \frac{RT}{V_C} [H_2O_{Cin} + C_1 \cdot I_{st} - (H_2O_{Cin} + C_1 \cdot I_{st} + C_2 \cdot I_{st} - C_2 \cdot I_{st}) F_{H_2O_C} \\ &\quad + C_2 \cdot I_{st} - \gamma \cdot C_2 \cdot I_{st}] \end{aligned} \quad (3-14)$$

因为初始摩尔分数 γ_{H_2} 、 γ_{O_2} 和 γ_{N_2} 分别被设为 0.99、0.21 和 0.79^[3,7,19]，所以输入值 H_{2in} 、 O_{2in} 和 N_{2in} 由摩尔分数定义如下：

$$\begin{aligned} H_{2in} &= \gamma_{H_2} \cdot \text{Anode}_{in} \\ O_{2in} &= \gamma_{O_2} \cdot \text{Anode}_{in} \\ N_{2in} &= \gamma_{N_2} \cdot \text{Cath}_{in} \end{aligned} \quad (3-15)$$

在阳极和阴极入口，水流率可以用相对湿度、饱和压力和每侧的总压力来表达如下^[2]：

$$\begin{aligned} H_2O_{Ain} &= \frac{\varphi_a P_{vs}}{P_A - \varphi_a P_{vs}} \cdot \text{Anode}_{in} \\ H_2O_{Cin} &= \frac{\varphi_c P_{vs}}{P_C - \varphi_c P_{vs}} \cdot \text{Cath}_{in} \end{aligned} \quad (3-16)$$

式中， φ_a 和 φ_c 分别是在阳极和阴极侧的相对湿度， $P_A = P_{H_2} + P_{H_2O_A}$ 是阳极分压的

总和, $P_c = P_{O_2} + P_{N_2} + P_{H_2O_c}$ 是阴极分压的总和。 P_{vs} 是饱和压力, 可以在热力学表中找到^[20]。相对湿度 φ_a 和 φ_c , 可以由阳极注入水 u_{a_h} 和阴极注入水 u_{c_h} 来定义。此外, $Anode_{in}$ 和 $Cath_{in}$ 分别定义为输入控制变量 u_a 和 u_c 与每侧转换因子 k_a 和 k_c 的乘积^[11,18], 单位也由标准升/秒 (L/s, Standard Liters Per Minute, SLPM) 变为摩尔/秒 (mol/s)。换句话说,

$$\begin{aligned} Anode_{in} &= u_a \cdot k_a \\ Cath_{in} &= u_c \cdot k_c \end{aligned} \quad (3-17)$$

式中的转换因子 k_a 和 k_c 分别是 0.065 mol/s。假定氢气和空气化学计量比是恒定的, 这样可以保证这两种反应物被持续送入并流过电池堆^[20]。因此, 燃料电池控制主要依靠输入控制变量 u_a 和 u_c 。首先, 阳极气压 $P_A = P_{H_2} + P_{H_2O_A}$ 和阴极气压 $P_c = P_{O_2} + P_{N_2} + P_{H_2O_c}$ 将分别由 u_a 和 u_c 控制, 以避免不必要的压力波动, 防止膜电极组件的损坏, 帮助延长燃料电池堆的寿命^[15]。因为注水系统有一个非常缓慢的时间常数 τ_d 约 70s^[21], 我们可以用一阶时间延迟注入水 u_{a_h} 和 u_{c_h} 来控制两侧的相对湿度。因此, 在燃料电池动态模型中, 我们为水注入使用一阶时间延迟模型, 水注入输入和相对湿度关系的状态方程可以推导如下:

$$\varphi_a = \frac{1}{1 + \tau_d s} u_{a\_h}; \varphi_b = \frac{1}{1 + \tau_d s} u_{b\_h} \quad (3-18)$$

式中 φ 是相对湿度。从式 (3-16) 可以看到, 每个水注入输入是湿度的函数, 水注入输入也影响压力的控制。因此, 可以建立一个质子交换膜燃料电池的动态模型。我们将在第四章详细描述控制设计。

3.5 质子交换膜燃料电池的电化学电路模型

3.5.1 等效电路

质子交换膜燃料电池的另一个重要建模方法是使用等效电路。这种模型的好处是通过使用等效电路代替燃料电池, 可以简化质子交换膜燃料电池的分析、模拟或研究。在本节中, 我们将介绍文献 [22] 中提出的典型电路。

这里介绍用数学方法来建立质子交换膜燃料电池堆的动态模型。以下是一些假设^[2,4,8,18,23]:

- 一维处理。
- 气体是理想的和均匀分布的。
- 在燃料电池气体流道里压力恒定。
- 燃料先被加湿, 氧化剂是加湿的空气。假设阳极有效水蒸气压是饱和蒸气压的 50%, 而阴极有效水蒸气压是饱和蒸气压的 100%。
- 燃料电池在 100℃ 以下工作, 反应产物是液体的。

- 在电池堆平均温度下进行热力性能评估，整个电池堆的温度变化可忽略，并且假定整个电池堆的比热容量是常数。
- 单个燃料电池的参数可以加起来代表燃料电池堆的参数。

图 3-6 是质子交换膜燃料电池及其内部电压降的示意图。至于质子交换膜燃料电池的工作细节，读者可以参考文献 [18, 23, 24]。

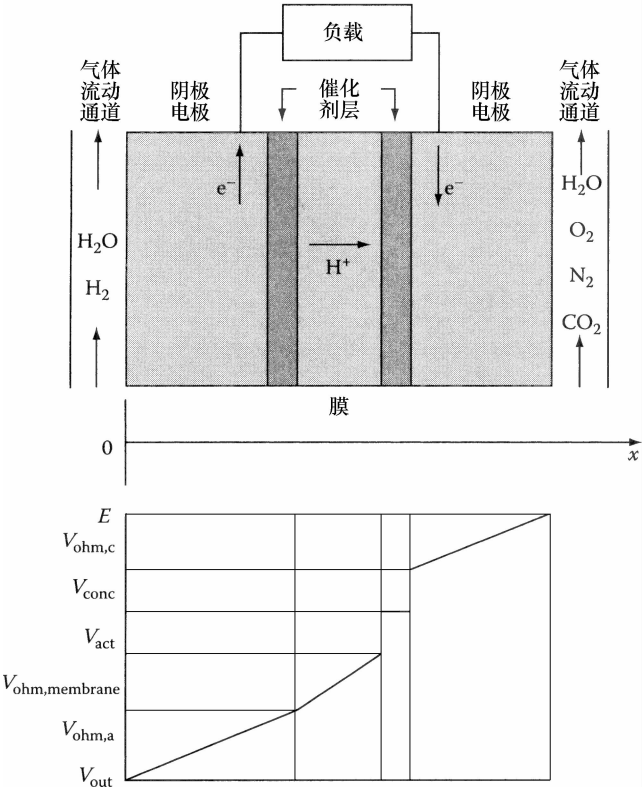


图 3-6 质子交换膜燃料电池和电压降的示意图

在研究了氢气和氧气的有效分压后，可以用文献 [25] 中的理想气体方程来研究氢气和氧气有效分压的瞬态变化。燃料电池输出电压可以写成如下^[22]：

$$V_{\text{out}} = E - V_c - V_{\text{act1}} - V_{\text{ohm}}$$

式中 E ——每个电池的可逆电压 (V)；

V_c ——整个电容的电压；

$V_{\text{act}} = V_{\text{act1}} + V_{\text{act2}}$ ，其中 $V_{\text{act1}} = \eta_0 + a(T - 29)$ 是只受燃料电池内部温度影响

的电压降；而 $V_{act2} = bT \ln(I)$ 是依赖电流和温度的电压；

V_{ohm} ——总的欧姆电压降。

根据以上电压输出方程，可以得到图 3-7 所示的等效电路。在这个电路中， C 是双层充电效应的等效电容。

3.5.2 模拟结果

为了在 Simulink 和 PSPICE 中验证这个模型，我们使用了 SR-12 Avista Labs 500W 质子交换膜燃料电池的实际输入和输出数据。其中使用的电流负载是 Chroma 63 112 可编程电子负载。电流信号是用 LEM LA100-P 的电流传感器测量的，输出电压是用 LEM LV25-P 的电压传感器测量的，温度是通过 K 型热电偶和模拟接头测量的。电脑上用一个 12-位 Advantech 数据采集卡来收集（图 3-8 和 3-9）。

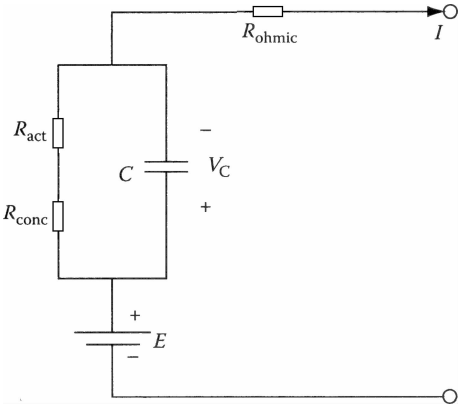


图 3-7 质子交换膜燃料电池的等效电路

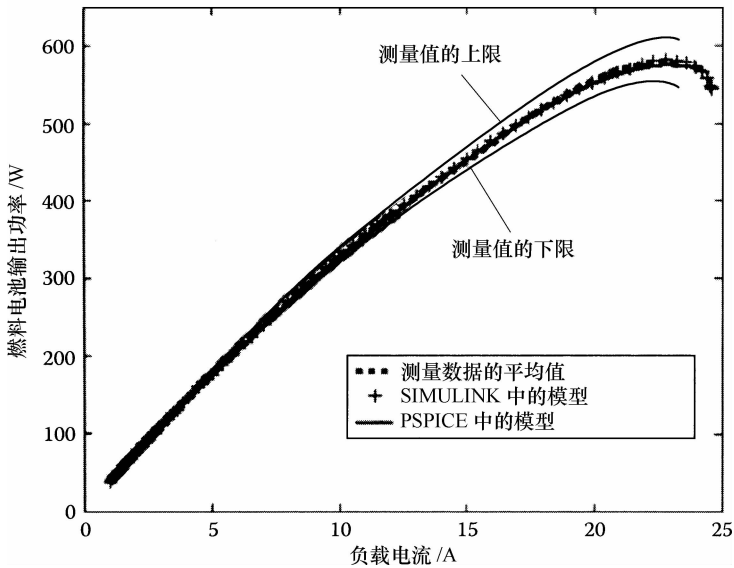


图 3-8 SR-12 功率-电流特性的测量值和模拟值

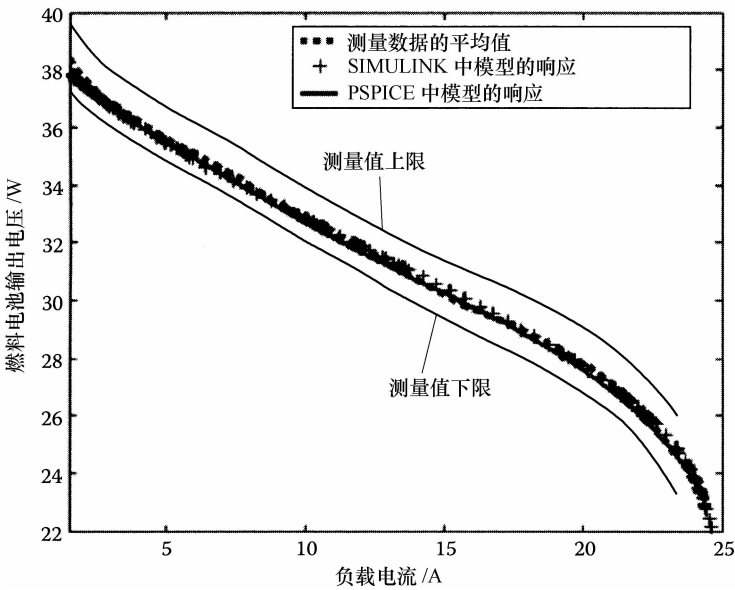


图 3-9 SR-12 电压-电流特性的测量值和模拟值

3.6 质子交换膜燃料电池的线性动态模型

我们的研究将限定在质子交换膜燃料电池的“动态”性能，而不是“静态”性能^[26-28]。当然，我们也可以通过动态方程的一个极限情况来得到静态方程，并且把它的性能和那些推导的静态方程做比较^[29]。这些稳态模型只能用于模拟电池的稳态性能，而不能用于描述暂态状态并在模型基础上进行反馈控制。可是这对于某些应用又是非常重要的。对于汽车应用这一点特别成问题，因为其中的机械量和电量变化很快。

此外，我们的着重点是燃料电池堆本身，因此我们不会介绍配套设备（系统）的性能，其中包括氢气和空气供应、热管理设备和加湿器等。

因为质子交换膜燃料电池的动态性能在本质上是非线性的，所以任何对这些动态性能的线性模拟都只是原来非线性方程组的逼近。以下介绍迄今为止的不同线性逼近模型的研究工作。

3.6.1 Chiu 等人的模型

这是最早提出的描述燃料电池动态性能的线性模型之一^[18]。它以非线性动态方程组为起点。为了使这些方程线性化，在一个特别工作点附近，使用小波动法来把燃料电池近似成线性系统。在小波动可以满足的条件下，这个模型可以用作瞬态响应分析和控制系统设计。

在 Larminie 和 Dicks 的文献 [30] 中定义了质子交换膜燃料电池的输出电压，

给出了电池堆电压方程

$$E = N \left(E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left\{ \frac{P_{H_2} (P_{O_2}/P_{std})^{1/2}}{P_{H_2O_c}} \right\} - L \right) \quad (3-19)$$

式中, E 、 N 、 E_0 、 T 和 L 分别代表电池堆输出电压、电池堆的电池数、电池在标准压力下的开路电压、工作温度和电压损失。此外, P_{H_2} 、 P_{O_2} 和 $P_{H_2O_c}$ 分别代表电池内每种气体的分压。 R 是通用气体常数, F 是法拉第常数, P_{std} 是标准压力。注意, 在方程里隐含的假设是电池堆中的所有的电池都是相同的。

质子交换膜燃料电池的电压损失 L 包括以下部分:

- 激活损失——由于电池内的化学反应很慢带来的损失。可最大限度地提高催化剂的接触面积来减小这个损失。
- 内部电流损失——部分电子通过膜泄漏到阴极侧, 而不是通过外电路收集使用带来的损失。这对开路电压影响很大。
- 电阻损失——电流通过整个电路的电阻带来的损失。电阻包括膜和各种连接线, 其中起作用最大的是膜, 需要有效的水管理来保持膜湿度以降低欧姆损失。
- 质量传输或浓度损失——由于在电极表面的气体浓度变化而引起的损失。

因此, 电压损失 L 可以表示为

$$L = (i + i_n) r + a \ln \left(\frac{i + i_n}{i_o} \right) - b \ln \left(1 - \frac{i + i_n}{i_l} \right) \quad (3-20)$$

式中 i ——输出电流密度;

i_n ——与内部电流损耗相关的内部电流密度;

i_o ——与激活损耗相关的交换电流密度;

i_l ——与浓度损耗相关的限制电流密度;

r ——与电阻损耗相关的面电阻;

a 和 b ——常数。

3.6.1.1 燃料电池的小信号模型

从式 (3-19) 和式 (3-20) 中, 我们可以看到一些非线性项。为了使这些电池电压方程线性化, 在燃料电池的一些特定工作点附近, 用小波动法把动态模拟成线性系统, 然后, 对于输入值的小波动, 可以很容易得到这些工作点的输出电压动态响应。

3.6.1.1.1 状态方程

首先, 我们把氢气、氧气的和水 (在阴极侧) 的分压定义成系统状态变量。由于水管理是影响性能的因素, 我们必须同时在阳极和阴极侧使用加湿器来控制电池内的湿度。阴极侧的水比阳极侧的水其影响更为复杂, 因为它不仅包括从加湿器来的水, 还包括反应副产品的水。图 3-10 表示流入流出电池的各种气体/水蒸气。

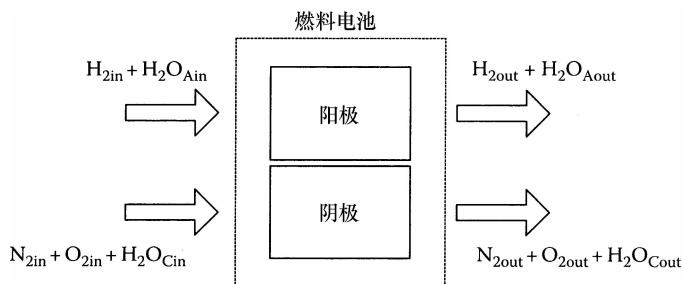


图 3-10 质子交换膜燃料电池的气体/水蒸气流动示意图

根据理想气体定律 $PV = nPT$ ，每个气体分压与电池内气体量成正比，而气体量等于入口气流率减去消耗气体量和出口气流率。因此，状态方程是

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_A} (H_{2in} - H_{2used} - H_{2out}) \quad (3-21)$$

$$\frac{dP_{O_2}}{dt} = \frac{RT}{V_C} (O_{2in} - O_{2used} - O_{2out}) \quad (3-22)$$

$$\frac{dP_{H_2O_c}}{dt} = \frac{RT}{V_C} (H_2O_{Cin} + H_2O_{Cproduced} - H_2O_{Cout}) \quad (3-23)$$

式中 H_{2in} 、 O_{2in} 和 H_2O_{Cin} 分别是氢气、氧气和阴极侧水的入口流率； H_{2out} 、 O_{2out} 和 H_2O_{Cout} 分别是每种气体的出口流率。此外， H_{2used} 、 O_{2used} 和 $H_2O_{Cproduced}$ 代表气体使用率和产生率，它们与输出电流 I 的关系是

$$H_{2used} = 2O_{2used} = H_2O_{Cproduced} = 2K_r I = 2K_r A_c i \quad (3-24)$$

式中 $K_r = N/4 F$ ；

A_c ——电池有效面积；

i ——电池电流密度。

既然可以测量入口流率和输出电流，我们可以通过以下方程来确定出口流率

$$H_{2out} = (Anode_{in} - 2K_r A_c i) F_{H_2} \quad (3-25)$$

$$O_{2out} = (Cath_{in} - K_r A_c i) F_{O_2} \quad (3-26)$$

$$H_2O_{Cout} = (Cath_{in} + 2K_r A_c i) F_{H_2O_c} \quad (3-27)$$

式中 $Anode_{in}$ 是阳极入口流率， $Anode_{in} = H_{2in} + H_2O_{Ain}$ ， $Cath_{in}$ 是阴极入口流率， $Cath_{in} = N_{2in} + O_{2in} + H_2O_{Cin}$ 。 F_{H_2} 、 F_{O_2} 和 $F_{H_2O_c}$ 分别是燃料电池内的每种气体的分压。在这里，我们要指出这个模型与原美国能源部（DOE）模型在定义压力分数上微妙却重要的差异^[31]。

在原美国能源部（DOE）模型中，

$$F_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P_{op}} \quad (3-28)$$

$$F_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P_{op}} \quad (3-29)$$

$$F_{H_2O_c} = \frac{P_{H_2O_c}}{P_{op}} \quad (3-30)$$

但在文献 [32] 提出的模型中，

$$F_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P_{H_2} + P_{H_2O_a}} \quad (3-31)$$

$$F_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P_{N_2} + P_{O_2} + P_{H_2O_c}} \quad (3-32)$$

$$F_{H_2O_c} = \frac{P_{H_2O_c}}{P_{N_2} + P_{O_2} + P_{H_2O_c}} \quad (3-33)$$

在原美国能源部模型中，假设电池阳极和阴极的压力恒定在稳态的工作压力 P_{op} 。可是我们使用的模型是为了分析燃料电池的瞬态性能，必须考虑一旦改变了一些条件后，对每种气体气压的小波动。因此，我们在式 (3-31) ~ (3-33) 中使用气体分压的总和而不是假设工作压力恒定。

为了得到状态方程矩阵，我们把式 (3-24) ~ (3-33) 代入式 (3-21) ~ (3-23)，并在两侧求微分。

举例说，我们将式 (3-25) 和式 (3-28) 代入式 (3-21)，就变成

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_A} \left[H_{2in} - 2K_r A_c i - (Anode_{in} - 2K_r A_c i) \frac{P_{H_2}}{P_{op}} \right]$$

接着，对给定的稳态工作点进行线性化（一阶近似）就会得到

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta P_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_A} \left[- \left(\frac{H_{2in}}{\gamma_{H_2}} - 2K_r A_c i \right) \frac{1}{P_{op}} \Delta P_{H_2} + \left(1 - \frac{P_{H_2}}{\gamma_{H_2} P_{op}} \right) \Delta H_{2in} \right. \\ \left. - 2K_r A_c \frac{P_{op} - P_{H_2}}{P_{op}} \Delta i \right] \end{aligned} \quad (3-34)$$

式中 ΔP_{H_2} 、 ΔH_{2in} 和 Δi 是每个变量的小波动，而 γ_{H_2} 是在阳极入口的氢气摩尔分数，定义为 $H_{2in}/Anode_{in}$ 。此外，式中的状态变量和输入变量需要被选定工作点的稳态值取代。

根据这个例子，我们可以得到了能源部和 Chiu 等人模型的其他方程。

(i) 原能源部模型

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta P_{O_2}}{dt} = \frac{RT}{V_c} \left[-(\text{Cath}_{in} - K_r A_c i) \frac{1}{P_{op}} \Delta P_{O_2} - K_r A_c \frac{P_{op} - P_{O_2}}{P_{op}} \Delta i \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{P_{O_2}}{(\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}) P_{op}} \right) \Delta O_{2in} - \frac{P_{O_2}}{(\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}) P_{op}} \Delta H_2O_{Cin} \right] \quad (3-35) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta P_{H_2O_c}}{dt} = \frac{R^* T}{V_c} \left[-(\text{Cath}_{in} + 2K_r A_c i) \frac{1}{P_{op}} \Delta P_{H_2O_c} - \frac{P_{H_2O_c}}{(\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}) P_{op}} \Delta O_{2in} \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{P_{H_2O_c}}{(\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}) P_{op}} \right) \Delta H_2O_{Cin} + 2K_r A_c \frac{P_{op} - P_{H_2O_c}}{P_{op}} \Delta i \right] \quad (3-36) \end{aligned}$$

其中 γ_{O_2} 是氧气在阴极入口的摩尔分数, 定义为 O_{2in}/Cath_{in} , γ_{H_2O} 是水在阴极入口的摩尔分数, 定义为 $H_2O_{Cin}/\text{Cath}_{in}$, 因此 $\text{Cath}_{in} = O_{2in} + H_2O_{Cin}/\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}$

(ii) Chiu 等人的模型

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta P_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_A} \left[-(\text{Anode}_{in} - 2K_r A_c i) \frac{P_{H_2O_a}}{(P_{H_2} + P_{H_2O_a})^2} \Delta P_{H_2} \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{P_{H_2}}{\gamma_{H_2} (P_{H_2} + P_{H_2O_a})} \right) \Delta H_{2in} - 2K_r A_c \frac{P_{H_2O_a}}{P_{H_2} + P_{H_2O_a}} \Delta i \right] \quad (3-37) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta P_{O_2}}{dt} = \frac{RT}{V_c} \left[-(\text{Cath}_{in} - K_r A_c i) \frac{P_{N_2} + P_{H_2O_c}}{P_{cathode}^2} \Delta P_{O_2} + (\text{Cath}_{in} - K_r A_c i) \frac{P_{O_2}}{P_{cathode}^2} \Delta P_{H_2O_c} \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{P_{O_2}}{(\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}) P_{cathode}} \right) \Delta O_{2in} - \frac{P_{O_2}}{(\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}) P_{cathode}} \Delta H_2O_{Cin} \right. \\ \left. - K_r A_c \frac{P_{N_2} + P_{H_2O_c}}{P_{cathode}} \Delta i \right] \quad (3-38) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta P_{H_2O_c}}{dt} = \frac{RT}{V_c} \left[(\text{Cath}_{in} - 2K_r A_c i) \frac{P_{H_2O_c}}{P_{cathode}^2} \Delta P_{O_2} - (\text{Cath}_{in} + 2K_r A_c i) \frac{P_{N_2} + P_{O_2}}{P_{cathode}^2} \Delta P_{H_2O_c} \right. \\ \left. - \frac{P_{H_2O_c}}{(\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}) P_{cathode}} \Delta O_{2in} + \left(1 - \frac{P_{H_2O_c}}{(\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}) P_{cathode}} \right) \Delta H_2O_{Cin} \right. \\ \left. + 2K_r A_c \frac{P_{N_2} + P_{O_2}}{P_{cathode}} \Delta i \right] \quad (3-39) \end{aligned}$$

式中 $P_{H_2O_a}$ ——阳极的水蒸气分压;

P_{N_2} ——阴极的氮气分压;

$P_{cathode} = P_{N_2} + P_{O_2} + P_{H_2O_c}$

对于燃料电池的输出, 我们把式 (3-20) 代入式 (3-19) 并且在两侧求微分, 就可以得到电池堆输出电压小波动 ΔE 的线性方程,

$$\Delta E = N \left[\frac{RT}{2F} \frac{1}{P_{H_2}} \Delta P_{H_2} + \frac{RT}{4F} \frac{1}{P_{O_2}} \Delta P_{O_2} - \frac{RT}{2F} \frac{1}{P_{H_2O_c}} \Delta P_{H_2O_c} - \left(r + \frac{a}{i + i_n} + \frac{b}{i_1 - i - i_n} \right) \Delta i \right] \quad (3-40)$$

这是对特定工作点输入小波动的系统状态变化的响应。

3.6.1.1.2 线性状态空间模型

使用式 (3-34) ~ 式 (3-40)，可以组成一个氢燃料电池线性小信号状态空间模型：

$$\begin{aligned} \Delta &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x + D\Delta u \\ \Delta x &= [\Delta P_{H_2} \quad \Delta P_{O_2} \quad \Delta P_{H_2O_c}]^T \\ \Delta u &= [\Delta H_{2in} \quad \Delta O_{2in} \quad \Delta H_2O_{Cin} \quad \Delta i]^T \\ \Delta y &= \Delta E \end{aligned}$$

式中，在 Δx 中的三个系统状态是电池内部氢气、氧气和水蒸气分压的小波动，在 Δu 中四个输入是氢气、氧气、水蒸气入口流率的小波动和输出电流密度；而系统的输出 Δy 是燃料电池堆电压的小波动。

对于能源部模型，矩阵 A 、 B 、 C 和 D 是

$$A = RT \begin{bmatrix} -(\text{Anode}_{in} - 2K_r A_c i) \frac{1}{V_A P_{op}} & 0 & 0 \\ 0 & -(\text{Cath}_{in} - K_r A_c i) \frac{1}{V_C P_{op}} & 0 \\ 0 & 0 & -(\text{Cath}_{in} + 2K_r A_c i) \frac{1}{V_C P_{op}} \end{bmatrix} \quad (3-41)$$

$$B = RT \begin{bmatrix} \frac{1}{V_A} - \frac{P_{H_2}}{V_A \gamma_{H_2} P_{op}} & 0 & 0 & -2K_r A_c \frac{P_{op} - P_{H_2}}{V_A P_{op}} \\ 0 & \frac{1}{V_C} - \frac{P_{O_2}}{V_C (\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}) P_{op}} & -\frac{P_{O_2}}{V_C (\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}) P_{op}} & -K_r A_c \frac{P_{op} - P_{O_2}}{V_C P_{op}} \\ 0 & -\frac{P_{H_2O_c}}{V_C (\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}) P_{op}} & \frac{1}{V_C} - \frac{P_{H_2O_c}}{V_C (\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O_c}) P_{op}} & 2K_r A_c \frac{P_{op} - P_{H_2O_c}}{V_C P_{op}} \end{bmatrix}$$

$$C = N \frac{RT}{2F} \left[\frac{1}{P_{H_2}} \quad \frac{1}{2P_{O_2}} \quad -\frac{1}{P_{H_2O_c}} \right]$$

$$D = N \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad -\left(r + \frac{a}{i + i_n} + \frac{b}{i_1 - i - i_n} \right) \right]$$

对于 Chiu 等人的模型，矩阵 A 、 B 、 C 和 D 是

$$\begin{aligned}
 A = RT & \begin{bmatrix} -(\text{Anode}_{\text{in}} - 2K_r A_c i) \frac{P_{\text{H}_2\text{O}_a}}{V_A (P_{\text{H}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}_a})^2} & 0 & 0 \\ 0 & -(\text{Cath}_{\text{in}} - K_r A_c i) \frac{P_{\text{N}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}_c}}{V_C P_{\text{cathode}}^2} & (\text{Cath}_{\text{in}} - K_r A_c i) \frac{P_{\text{O}_2}}{V_C P_{\text{cathode}}^2} \\ 0 & (\text{Cath}_{\text{in}} + 2K_r A_c i) \frac{P_{\text{H}_2\text{O}_c}}{V_C P_{\text{cathode}}^2} & -(\text{Cath}_{\text{in}} + 2K_r A_c i) \frac{P_{\text{N}_2} + P_{\text{O}_2}}{V_C P_{\text{cathode}}^2} \end{bmatrix} \\
 B = RT & \begin{bmatrix} \frac{1}{V_A} - \frac{P_{\text{H}_2}}{V_A \gamma_{\text{H}_2} (P_{\text{H}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}_a})} & 0 & 0 & -2K_r A_c \frac{P_{\text{H}_2\text{O}_a}}{V_A (P_{\text{H}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}_a})} \\ 0 & \frac{1}{V_C} - \frac{P_{\text{O}_2}}{V_C (\gamma_{\text{O}_2} + \gamma_{\text{H}_2\text{O}_c}) P_{\text{cathode}}} & -\frac{P_{\text{O}_2}}{V_C (\gamma_{\text{O}_2} + \gamma_{\text{H}_2\text{O}_c}) P_{\text{cathode}}} & -K_r A_c \frac{P_{\text{N}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}_c}}{V_C P_{\text{cathode}}} \\ 0 & -\frac{P_{\text{H}_2\text{O}_c}}{V_C (\gamma_{\text{O}_2} + \gamma_{\text{H}_2\text{O}_c}) P_{\text{cathode}}} & \frac{1}{V_C} - \frac{P_{\text{H}_2\text{O}_c}}{V_C (\gamma_{\text{O}_2} + \gamma_{\text{H}_2\text{O}_c}) P_{\text{cathode}}} & 2K_r A_c \frac{P_{\text{N}_2} + P_{\text{O}_2}}{V_C P_{\text{cathode}}} \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \quad (3-42)$$

$$C = N \frac{RT}{2F} \begin{bmatrix} \frac{1}{P_{\text{H}_2}} & \frac{1}{2P_{\text{O}_2}} & -\frac{1}{P_{\text{H}_2\text{O}_c}} \end{bmatrix}$$

$$D = N \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad - \left(r + \frac{a}{i + i_n} + \frac{b}{i_l - i - i_n} \right) \right]$$

3.6.1.2 仿真和测量结果的比较

根据上述小信号线性状态空间模型，我们用 MATLAB® 来模拟质子交换膜燃料电池的动态响应。这个燃料电池模型的主要参数值列于表 3-4，对应着美国能源部国家能源技术实验室在西弗吉尼亚州摩根镇测试的一个燃料电池堆（包括四个电池）。根据辅助测量的估计，在式（3-40）中，电流密度单位小波动导致瞬态电压变化的 Δi 系数是 $30.762 \mu\Omega \text{m}^2$ 。此外，在选定的负载电流 40A 工作点，根据输入和输出的稳态值可以计算状态变量的稳态值，然后再代入矩阵 A ， B ， C 和 D 。

下面的两个图比较了测试燃料电池堆能源部模型和 Chiu 等人模型的响应。在保持入口流率恒定的条件下，它们是输出电压对输入负载电流阶跃变化的响应。图 3-11 所示是第一个测试情况的结果，电池堆在稳态条件下运作， $\text{H}_{2\text{in}} = 3, 664 \text{ mL/min}$ ， $\text{N}_{2\text{in}} + \text{O}_{2\text{in}} = 11, 548 \text{ mL/min}$ （假设均匀地分配给

表 3-4 燃料电池模型的主要参数

电池有效面积 $A_c = 136.7 \text{ cm}^2$
阳极的体积 $V_A = 6.495 \text{ cm}^3$
阴极的体积 $V_C = 12.96 \text{ cm}^3$
电池数 $N = 4$
工作压力 (原能源部模型) $p_{\text{op}} = 101 \text{ kPa}$

这四个电池)， $T = 338.5 \text{ K}$ ，负载电流是 40A。在第五秒时，负载电流突然增加到 50A，所测的电池堆输出电压（数据采集速率是每秒 0.2 个样品）快速降低，然后稳定在一个恒定值，这个过程伴随有一些“噪声”。我们使用能源部模型 [式 (3-41)] 和 Chiu 等人的小信号模型 [式 (3-42)] 来模拟这个 40A 工作电流的小波动。

图 3-11 所示是测量的输出电压响应及能源部模型预测的输出电压响应和 Chiu 等人模型预测的输出电压响应（起始于工作点 2.813V，在电流变化时，瞬态电压降是 $30.762\Delta i$ ）。Chiu 等人模型比能源部模型预测的值更好。

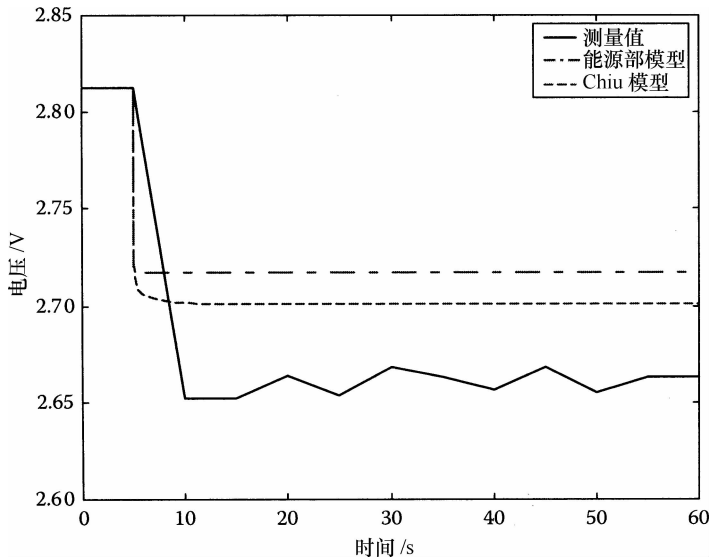


图 3-11 模拟和测量结果比较

工作条件： $H_{2in} = 3664\text{mL/min}$ ， $N_{in} + O_{2in} = 11,548\text{mL/min}$ ，
 T （工作或电池温度）=338.5K；小波动：在第五秒，
电流从 40A 突然增加到 50A。

请注意，测量与模拟稳态值的差异主要是由于精确输出电压表达式（3-19）的非线性。因为这个试验中的小波动相当大，所以我们可以预料电池堆的线性模型只是一个近似模型。

图 3-12 所示是第二个测试情况的结果，电池堆在稳态条件下工作， $H_{2in} = 3000\text{mL/min}$ ， $N_{2in} + O_{2in} = 10,000\text{mL/min}$ （假设均匀地分配给这四个电池）， $T = 338.5\text{K}$ ，负载电流是 40A。在 0.1s，负载电流突然增加至 42A，所测的电池堆输出电压（数据采集速率是每秒 100 个样品）快速降低，然后稳定在一个恒定值，这个过程伴随有一些“噪声”。我们使用能源部模型式（3-41）和 Chiu 等人的小信号模型式（3-42）来模拟这个 40A 工作电流的小波动。如图 3-12 所示，Chiu 等人模型预测的瞬态响应和稳态输出电压比能源部模型更好。然而，两个模型之间响应的差异，及它们与实测响应的差异也减少了。这是我们所料到的，因为所选工作点的小波动（比上一个情况）小很多。

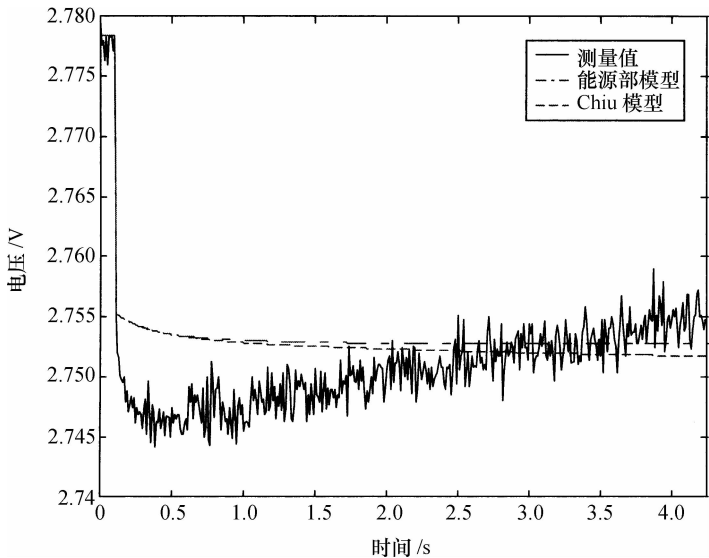


图 3-12 又一个模拟和测量结果的比较

工作条件: $H_{2in} = 3000\text{mL/min}$, $N_{2in} + O_{2in} = 10000\text{mL/min}$,
 T (工作或电池温度) = 338.5K;小波动:在 0.1s 时,
电流从 40A 突然加到 42A。

请注意,测量的输出电压响应在最初下跌后,随时间缓慢增加。在不同工作条件下,当负载增加后,都一致观察到这现象。而且小波动比大波动更容易观察到这现象(当使用更精细的电压刻度)。然而,这种现象似乎并不代表负脉冲和随后的恢复,因为它们属于线性动态系统。这可能是在负载变化后,膜含水量增加,电导率改变,导致电池电压逐渐增加。在今后的研究中需要解决这个问题。

3.6.2 Page 等人的模型

Page 等人使用了与文献 [33] 不同的方法来推导质子交换膜燃料电池的动态线性模型^[32](图 3-13)。这种方法根据从电池或电池堆采集的实验数据,通过最小二乘法来估计等效电路模型的参数(元件值)。然而,这是一个输入-输出模型,其中的等效电路内部变量并不对应任何实际的物理量。

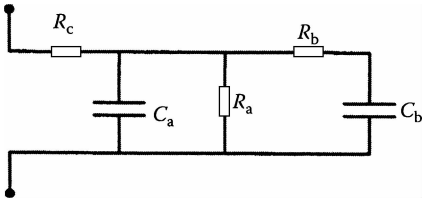


图 3-13 Page 等人的等效电路模型

3.6.3 南阿拉巴马大学的模型

他们使用了质子交换膜燃料电池的一个部分线性动态模型,来模拟电池中氢气、氧气和水的分压的一阶动态^[34,35]。然而,在模型中,燃料电池输出电压仍然非线性地依赖于这些分压。

3.6.4 其他模型

Pasricha 和 Shaw^[36]也使用了小信号法来模拟燃料电池的动态,但因为温度是主导系统变量(变化最慢),所以他们忽略除了温度以外的所有动态变量。无论如何,这种方法不会推出严格的燃料电池动态线性模型。

在文献[37]中介绍的动态模型(基本相当于一个等效电容),虽然比较了预测的稳态值和实际燃料电池的极化曲线,但并没有用实际燃料电池的瞬态响应数据来验证。

3.7 燃料电池输出响应的参数敏感性

现在有很大的研究动力来确定哪些参数对燃料电池的稳态和瞬态响应影响更大,因为这会促进改善模拟和设计(改进内部设计而不是外部控制器设计)。文献[38]中的敏感性分析使用了燃料电池电化学模型和从 500W BCS Technology 质子交换膜燃料电池堆采集的数据^[39]。他们的目的是确定每个参数对燃料电池模型模拟准确性的相对重要性。为了弄清这一点,他们使用了多参数敏感性分析法来计算燃料电池电化学模型的参数敏感性。为了表达燃料电池堆电化学性能,他们用一阶(一个电容)电路来模拟燃料电池的动态性能。但他们的主要关注点是燃料电池的“稳态”响应,并评估不同参数对电池堆极化曲线的影响。当电流变化后,双层充电效应导致燃料电池电压变化延迟这一现象,可以用一个等效电容作为参数来描述。所以为了评估这个模型“动态”反应的准确度,需要研究这个电容对模型阶跃响应的影响(代表在现实世界中的电流中断测量)。这个电容不会影响电池堆极化曲线,因为这条曲线上每个点的电压是在达到稳态值后采集的。正如所预料的,瞬时响应分析结果与基本电阻电容电路相似。

本节的其余部分将介绍对于输入输出传递函数(这是一个线性系统的概念)的敏感性分析结果^[40,41]。传递函数是根据第 3.6.1 节所述^[42]的线性小信号燃料电池动态模型推出的。这些结果能使我们更清楚地看到哪个物理参数对燃料电池动态响应的影响更大。

我们研究的传递函数代表了燃料电池输出电压(系统输出)对负载电流(系统输入)小波动的响应。这相当于它的输出阻抗。我们知道这种阻抗已经被研究很久了,通常是通过测量交流阻抗谱,来确定电池物理过程的特性、电性能和瞬时响应^[43-45]。但在这一章中,我们将介绍燃料电池输出阻抗略微不同的用途。

敏感性在数学上定义为一个函数对其参数的偏导数除以这个函数与这个参数的比率。在这里,它测量一个给定参数的单位变化对燃料电池输入输出传递函数的影响(小负载电流的变化)。燃料电池动态响应的敏感性可以用以下参数来评估:电池的有效面积,电池激活损耗参数(Tafel 塔菲尔线的斜率),浓度损耗参数,电池限制电流密度(对应于浓度损耗),电池内部电流密度(对应于内部电流损耗),

电池交换电流密度（对应于激活损耗），电池堆的电池数，电池面积比电阻（对应于电阻损耗），电池堆工作温度（实际上是一个工作条件参数），电池阳极体积和阴极体积。以下有几个图表示并比较这些敏感性函数。

3.7.1 燃料电池的动态响应及敏感性分析

现在请注意，燃料电池的输出阻抗代表输出电压对负载电流小波动的响应，这实际上是我们最感兴趣的系统传递函数。这个阻抗函数可从式（3-42）得到

$$G_{Vi}(s) = C(sl_3 - A)^{-1}B_4 + D_4$$

$$= \frac{c_{11}b_{14}}{s - a_{11}} + \frac{(c_{13}a_{32} + c_{12}(s - a_{33}))b_{24} + (c_{12}a_{23} + c_{13}(s - a_{22}))b_{34}}{(s - a_{22})(s - a_{33}) - a_{23}a_{32}} + d_4 \quad (3-43)$$

式中 s ——复频；

l_3 —— 3×3 单位矩阵；

B_4 和 D_4 ——矩阵 B 和 D 的第四列。

3.7.1.1 敏感性函数

我们可以对燃料电池的输出阻抗做敏感性分析，定量地确定燃料电池每个参数和工作点变量对阻抗的影响。分析结果可以帮助改进燃料电池系统的设计，以提高其动态性能。

在这里，敏感性函数定义为传递函数对于某个特定参数的偏微分式（3-43）除以传递函数与这个参数的比率，例如：

$$S_\theta = \frac{\partial G_{Vi}}{\partial \theta} \bigg/ \frac{G_{Vi}}{\theta} \quad (3-44)$$

式中 θ 代表燃料电池任何参数或工作点变量。它是系统对不同参数和变量的敏感性随频率变化的函数。

以下介绍 $G_{Vi}(s)$ 相对于 H_{2in} 的敏感性函数和 $G_{Vi}(s)$ 相对于 V_A 的敏感性函数。在推导的函数中它们是最简单的。

$G_{Vi}(s)$ 相对于 H_{2in} 的敏感性函数：

$$S_{H_{2in}} = \text{Num}_{H_{2in}}(s) / \text{Den}_{H_{2in}}(s) \quad (3-45)$$

$$\text{Num}_{H_{2in}}(s) = 2A_c H_{2in} K_1 K_2 P_{\text{anode}} P_{H_2O_a}^2 RT \gamma_{H_2} \quad (3-46)$$

$$\begin{aligned} \text{Den}_{H_{2in}}(s) = & FP_{H_2} (H_{2in} K_1 P_{H_2O_a} IK_1 K_2 P_{H_2O_a} \gamma_{H_2} + P_{\text{anode}}^2 s \gamma_{H_2})^2 \\ & [-4L(2A_c K_1 K_2 P_{\text{anode}} P_{H_2O_a} RT \gamma_{H_2}) / (FP_{H_2} \\ & (H_{2in} K_1 P_{H_2O_a} - IK_1 K_2 P_{H_2O_a} \gamma_{H_2} + P_{\text{anode}}^2 s \gamma_{H_2})) \\ & + (A_c K_2 K_3 P_{\text{cath}} (P_{H_2O_e} + P_{N_2}) RT \gamma_{O_2} - (P_{\text{cath}}^2 s \gamma_{O_2}) \\ & - K_3 (P_{N_2} - P_{O_2}) (O_{2in} + IK_2 \gamma_{O_2})) / (FP_{O_2} (2P_{\text{cath}}^4 s^2 \gamma_{O_2}^2 \\ & + K_3 P_{\text{cath}}^2 s \gamma_{O_2} (2O_{2in} (P_{H_2O_e} + 2P_{N_2} + P_{O_2}) - IK_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (P_{\text{H}_2\text{O}_c} - P_{\text{N}_2} - 2P_{\text{O}_2})\gamma_{\text{O}_2}) + K_3^2 P_{\text{N}_2} (P_{\text{cath}}) (2O_{2\text{in}}^2 + IK_2 O_{2\text{in}} \\
& \gamma_{\text{O}_2} + K_2^2 \gamma_{\text{O}_2}^2)) + (IA_c K_2 K_3 P_{\text{cath}} (P_{\text{N}_2} + P_{\text{O}_2}) RT \gamma_{\text{O}_2} \\
& (4IP_{\text{cath}}^2 s \gamma_{\text{O}_2} + K_3 (P_{\text{H}_2\text{O}_c} + 2P_{\text{N}_2}) (2IO_{2\text{in}} + K_2 \gamma_{\text{O}_2})) \\
& / (FP_{\text{H}_2\text{O}_c} (2P_{\text{cath}}^4 s^2 \gamma_{\text{O}_2}^2 + K_3 P_{\text{cath}}^2 s \gamma_{\text{O}_2} (2O_{2\text{in}} \\
& (P_{\text{H}_2\text{O}_c} + 2P_{\text{N}_2} + P_{\text{O}_2}) - IK_2 (P_{\text{H}_2\text{O}_c} - P_{\text{N}_2} - 2P_{\text{O}_2}) \gamma_{\text{O}_2}) \\
& + K_3^2 P_{\text{N}_2} (P_{\text{cath}}) (2O_{2\text{in}}^2 + IK_2 O_{2\text{in}} \gamma_{\text{O}_2} + K_2^2 \gamma_{\text{O}_2}^2)))] \quad (3-47)
\end{aligned}$$

$G_{V_i}(s)$ 相对于 V_A 的敏感性函数:

$$S_{V_A} = \text{Num}_{V_A}(s) / \text{Den}_{V_A}(s) \quad (3-48)$$

$$\text{Num}_{V_A}(s) = -2A_c K^2 P_{\text{anode}}^3 P_{\text{H}_2\text{O}_a} R^2 s T^2 V_A \quad (3-49)$$

$$\begin{aligned}
\text{Den}_{V_A}(s) = & FP_{\text{H}_2} (F_{\text{in}} P_{\text{H}_2\text{O}_a} RT - IK_2 P_{\text{H}_2\text{O}_a} RT + P_{\text{anode}}^2 s V_A)^2 [4L \\
& + (A_c K_2 K_3 P_{\text{cath}} (P_{\text{H}_2\text{O}_c} + P_{\text{N}_2}) R (A_{\text{in}} K_3 (P_{\text{N}_2} - P_{\text{O}_2}) + IK_2 K_3 \\
& (P_{\text{N}_2} - P_{\text{O}_2}) + P_{\text{cathode}}^2 s) T) / (FP_{\text{O}_2} (2A_{\text{in}}^2 K_3^2 P_{\text{N}_2} (P_{\text{cath}}) + K_2^2 K_3^2 \\
& P_{\text{N}_2} (P_{\text{cath}}) - IK_2 K_3 P_{\text{cath}}^2 (P_{\text{H}_2\text{O}_c} - P_{\text{N}_2} - 2P_{\text{O}_2}) s + 2P_{\text{cath}}^4 s^2 + A_{\text{in}} \\
& K_3 (IK_2 K_3 P_{\text{N}_2} (P_{\text{cath}}) + 2P_{\text{cath}}^2 (P_{\text{H}_2\text{O}_c} + 2P_{\text{N}_2} + P_{\text{O}_2}) s)) \\
& + (A_c K_2 K_3 P_{\text{cath}} (P_{\text{N}_2} + P_{\text{O}_2}) R (2A_{\text{in}} K_3 (P_{\text{H}_2\text{O}_c} + 2P_{\text{N}_2}) - IK_2 \\
& K_3 (P_{\text{H}_2\text{O}_c} + 2P_{\text{N}_2}) + 4P_{\text{cath}}^2 s) T) / (FP_{\text{H}_2\text{O}_c} (2A_{\text{in}}^2 K_3^2 P_{\text{N}_2} (P_{\text{cath}}) \\
& + K_2^2 K_3^2 P_{\text{N}_2} (P_{\text{cath}}) - IK_2 K_3 P_{\text{cath}}^2 (P_{\text{H}_2\text{O}_c} - P_{\text{N}_2} - 2P_{\text{O}_2}) s \\
& + 2P_{\text{cath}}^4 s^2 + A_{\text{in}} K_3 (IK_2 K_3 P_{\text{N}_2} (P_{\text{cath}}) + 2P_{\text{cath}}^2 (P_{\text{H}_2\text{O}_c} \\
& + 2P_{\text{N}_2} + P_{\text{O}_2}) s)) + (2A_c K_2 P_{\text{anode}} P_{\text{H}_2\text{O}_a} R^2 T^2) / (FP_{\text{H}_2} (F_{\text{in}} P_{\text{H}_2\text{O}_a} \\
& RT - IK_2 P_{\text{H}_2\text{O}_a} RT + P_{\text{anode}}^2 s V_A))]
\end{aligned}$$

式中

$$K_1 = (RT)/V_A; K_2 = 2K_r; K_3 = (RT)/V_c; P_{\text{anode}} = P_{\text{H}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}_a};$$

$$P_{\text{cath}} = P_{\text{O}_2} + P_{\text{N}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}_c}; F_{\text{in}} = H_{2\text{in}}/\gamma_{\text{H}_2}; A_{\text{in}} = O_{2\text{in}}/\gamma_{\text{O}_2}.$$

3.7.1.2 敏感性函数图

我们用 MATLAB 评估了输出阻抗各种敏感性函数, 然后再画图, 由于计算的敏感性函数是复杂的表达式, 参数和输入变量也很多, 在这里只画少数几个有代表性的。表 3-5 是我们使用的基准参数和输入值。这些值对应着美国能源部国家能源技术实验室在西弗吉尼亚州摩根镇的一个燃料电池堆。测量是在 2003 年进行的。这个电池堆有四个电池, 都使用空气 (而不是纯氧气)。

根据能源部国家能源技术实验室的模型, 我们推导了以下参数的敏感性函数: 阳极和阴极的体积、有效面积、输出电流密度、电池的温度、入口氢气流量率、入口空气流量率和电压损失常数。再根据能源技术实验室燃料电池的参数值和一套工作条件, 我们画出了以下这些图。

表 3-5 用于敏感性分析的燃料电池参数和输入值

参数或输入	参数或输入的描述	参数值或输入值
N	电池堆电池数	4
T	电池堆工作温度	338.6K
H_{2in}	阳极入口氢气流率	3 000mL/min
Air_{in}	阳极入口氧气流率	10 000mL/min
I	电池输出电流	40.25A
A_c	电池有效面积	136.7cm ²
i	电池输出电流密度	2 926A/m ²
V_A	电池阳极通道体积	6.495cm ³
V_C	电池阴极通道体积	12.96cm ³
L	电池电压损失的和	-36μV/电池 (对于 2.2A 的变化)
a	与电池激活损耗相关的常数(Tafel 塔菲尔线的斜率)	0.06V
b	与电池浓度损耗相关的常数	0.05V
i_n	与内电流损耗相关的电池内电流密度	20A/m ²
i_o	与激活损耗相关的电池交换电流密度	
i_l	与浓度损耗相关的电池限制电流密度	9000A/m ²
r	与电阻损耗相关的电池面积比电阻	3μΩ m ²
γ_{H_2}	阳极入口的氢气摩尔分数	0.9
γ_{O_2}	阳极入口的氧气摩尔分数	0.189(=0.9×0.21)

燃料电池的输出阻抗相对于电池阳极体积的敏感性曲线见图 3-14。从曲线中可以看到，总的阻抗函数在频率约为 1rad/s 时对阳极体积的变化更加敏感。

燃料电池的输出阻抗相对于电池阴极体积的敏感性曲线见图 3-15。从曲线中可以看到，总的阻抗函数在频率约为 1rad/s 时对阴极体积的变化更加敏感。

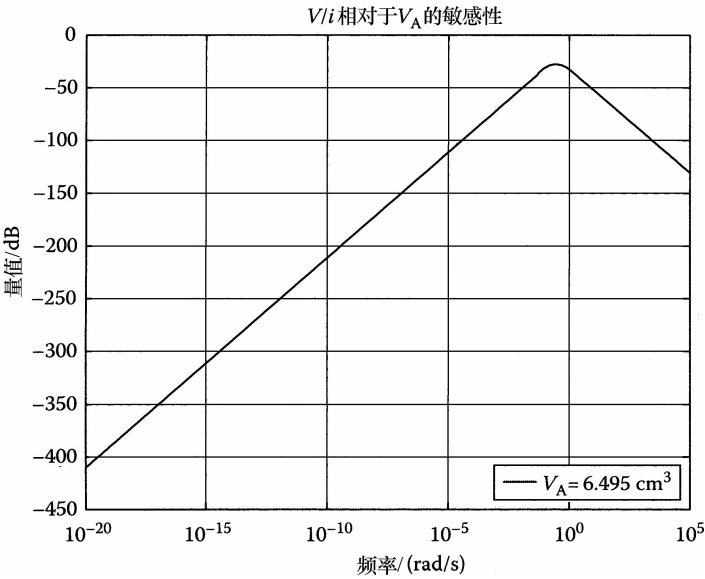


图 3-14 输出阻抗相对于电池阳极体积的敏感性曲线

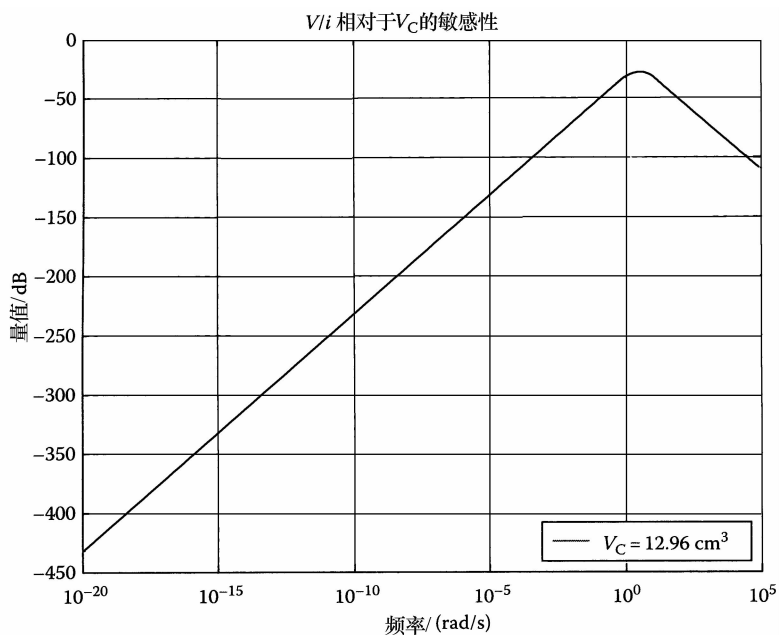


图 3-15 输出阻抗相对于电池阴极体积的敏感性曲线

燃料电池的输出阻抗相对于燃料电池有效面积的敏感性曲线见图 3-16。从曲线中可以看到，总的阻抗函数在频率低时对电池有效面积的变化更加敏感。

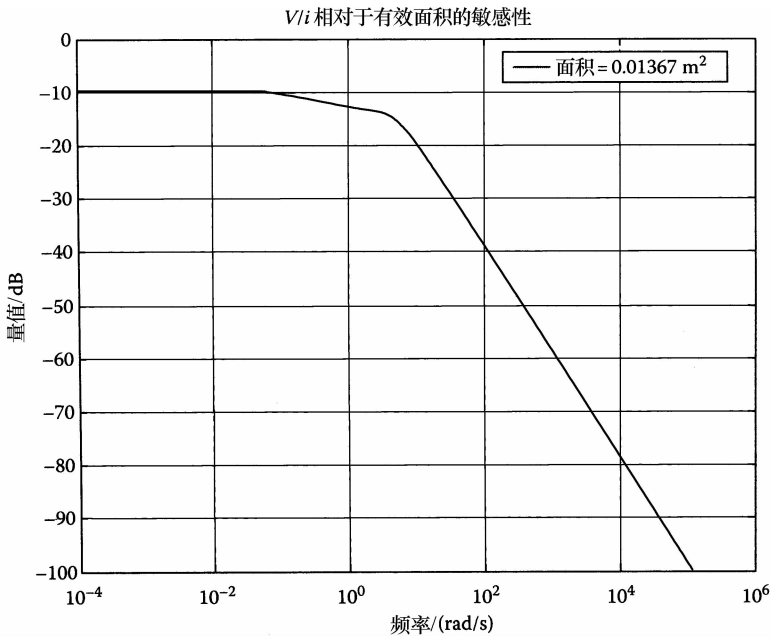


图 3-16 输出阻抗相对于燃料电池有效面积的敏感性曲线

燃料电池的输出阻抗相对于燃料电池的输出电流密度的敏感性曲线见图 3-17。从曲线中可以看到，总的阻抗函数在频率为 10rad/s 以上时对电池输出电流密度的变化更加敏感。

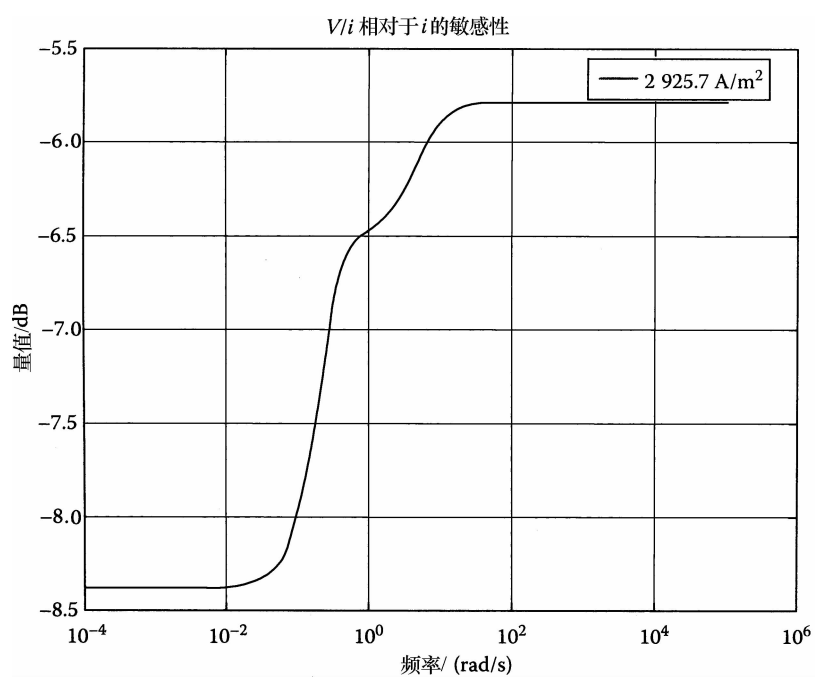


图 3-17 输出阻抗相对于燃料电池输出电流密度的敏感性曲线

燃料电池的输出阻抗相对于入口氢气流率的敏感性曲线见图 3-18。从曲线中可以看到，总的阻抗函数在频率为 10rad/s 以下时对入口氢气流率的变化更加敏感。

燃料电池的输出阻抗相对于入口空气流率的敏感性曲线见图 3-19。从曲线中可以看到，总的阻抗函数在频率为 1rad/s 以下时对入口空气流率的变化更加敏感。

燃料电池的输出阻抗相对于电池温度的敏感性曲线见图 3-20。从曲线中可以看到，总的阻抗函数在频率为 0.1rad/s 左右时对电池温度的变化更加敏感。

燃料电池的输出阻抗相对于电压损失常数 a 的敏感性曲线见图 3-21。从曲线中可以看到，总的阻抗函数在频率为 10rad/s 以上时对电压损失常数 a 的变化更加敏感。

燃料电池的输出阻抗相对于电压损失常数 b 的敏感性曲线见图 3-22。从曲线中可以看到，总的阻抗函数在频率为 10rad/s 以上时对电压损失常数 b 的变化更加敏感。

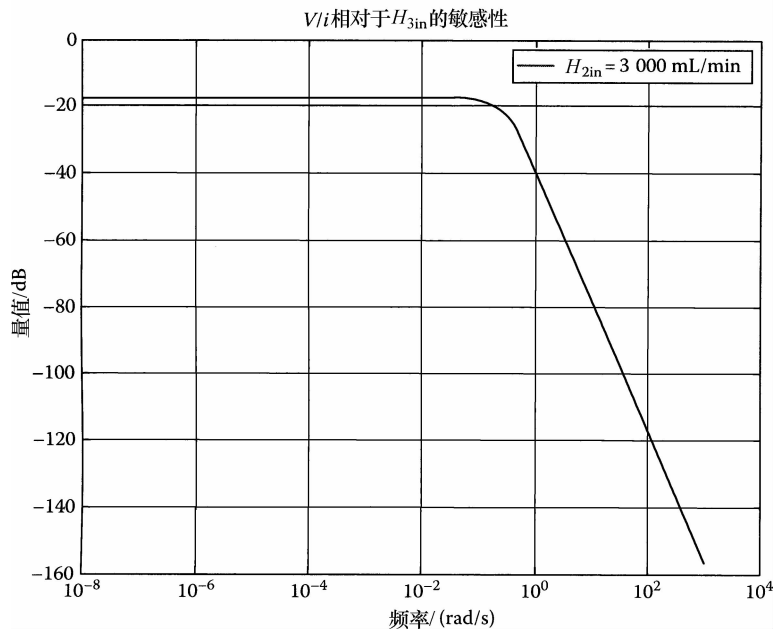


图 3-18 输出阻抗相对于入口氢气流率的敏感性曲线

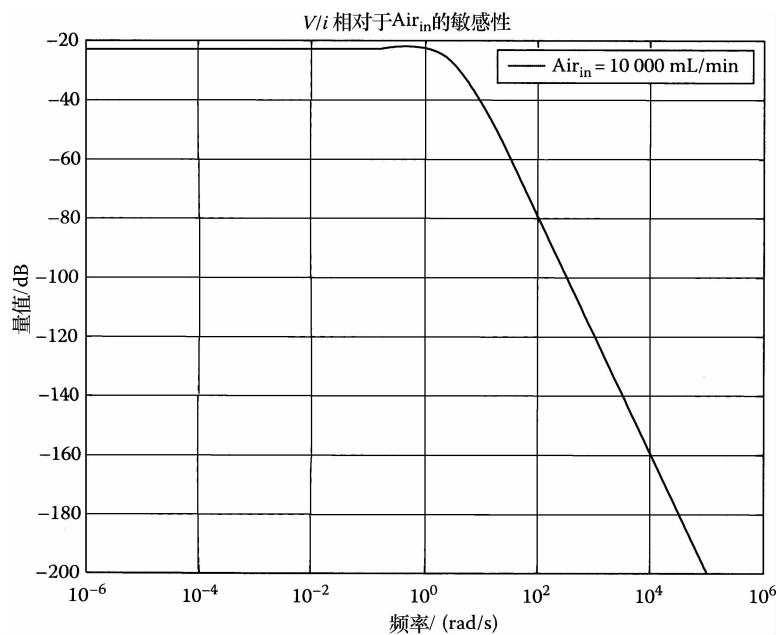


图 3-19 输出阻抗相对于入口空气流率的敏感性曲线

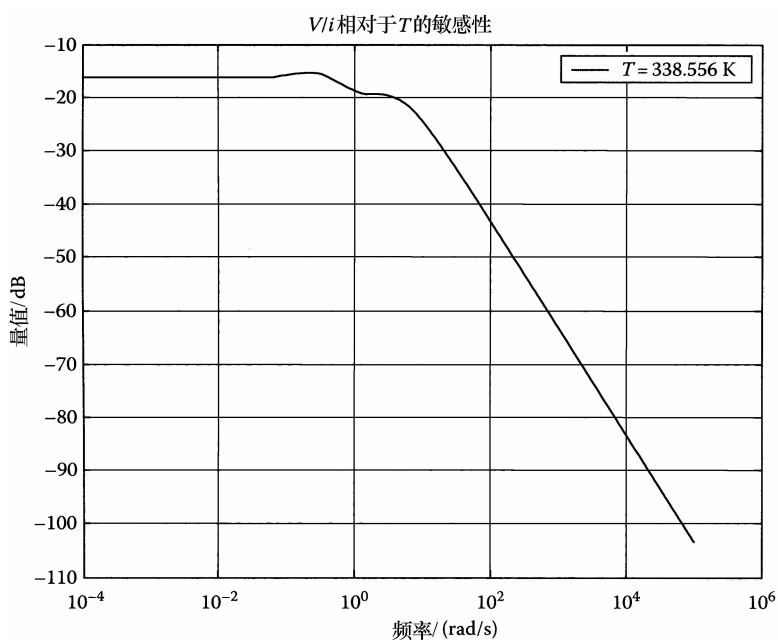


图 3-20 输出阻抗相对于电池温度的敏感性曲线

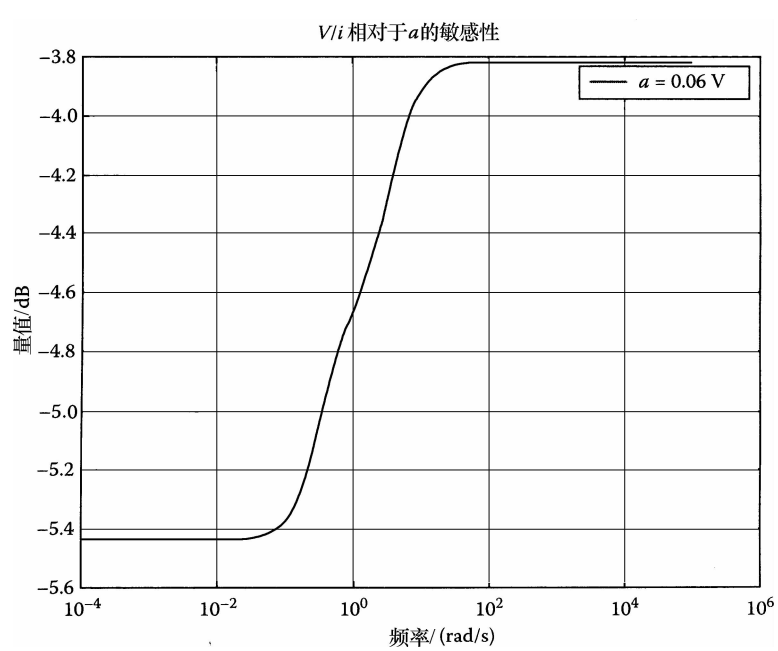


图 3-21 输出阻抗相对于电压损失常数 a 的敏感性曲线

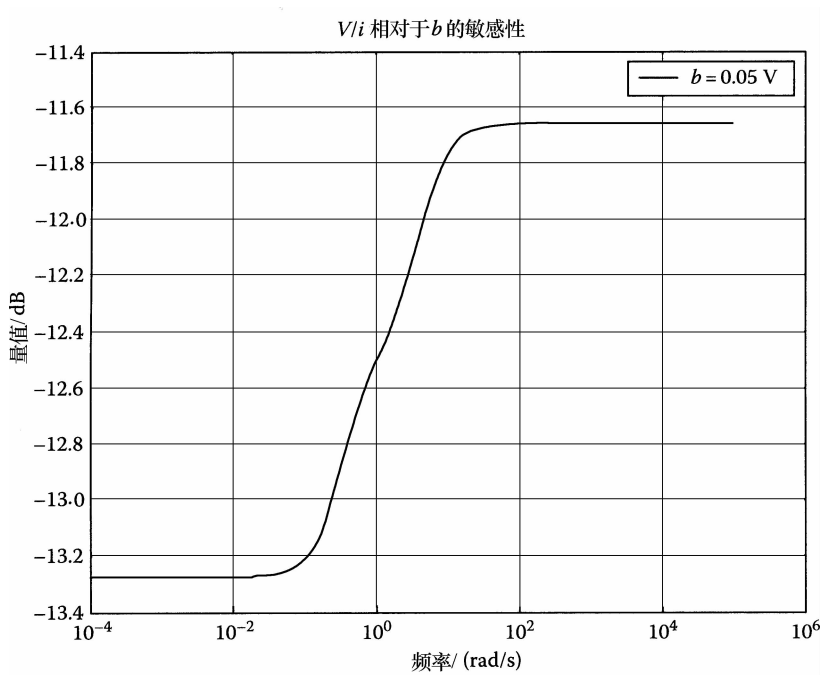


图 3-22 输出阻抗相对于电压损失常数 b 的敏感性曲线

燃料电池的输出阻抗相对于内部电流密度常数 i_n 的敏感性曲线见图 3-23。从曲线中可以看到，总的阻抗函数在频率为 10rad/s 以上时对内部电流密度的变化更加敏感。

燃料电池的输出阻抗相对于限制电流密度常数 i_l 的敏感性曲线见图 3-24。从曲线中可以看到，总的阻抗函数在频率为 10rad/s 以上时对限制电流密度的变化更加敏感。

燃料电池的输出阻抗相对于面积比电阻 r 的敏感性曲线见图 3-25。从曲线中可以看到，总的阻抗函数在频率为 10rad/s 以上时对面积比电阻 r 的变化更加敏感。

比较图 3-14 和 3-15 输出阻抗相对于阳极和阴极体积的敏感性，我们可以看到这两个曲线有点类似。然而，在频率为 1rad/s 以上时，阴极体积敏感性函数的量值比阳极体积敏感性函数的量值大，在频率为 1rad/s 以下时，反之亦然。因此，我们推断，在一般的工作条件下，电池动态响应的高频部分对阴极体积的变化比对阳极体积的变化更加敏感。当考查图 3-16 燃料电池阻抗相对于电池有效面积的敏感性曲线时，我们可以看到总的阻抗函数在频率为 1rad/s 以下时比在频率为 1rad/s 以上时对电池有效面积的变化更敏感。图 3-18 和 3-19 是电池阻抗相对于氢气和空气入口流率的敏感性曲线。从这两个曲线中我们可以看到，阻抗在频率为 0.1rad/s

以下频率对氢气流率的变化更敏感，而在另一方面，阻抗在频率为 0.1rad/s 以上时对空气流率的变化更敏感。

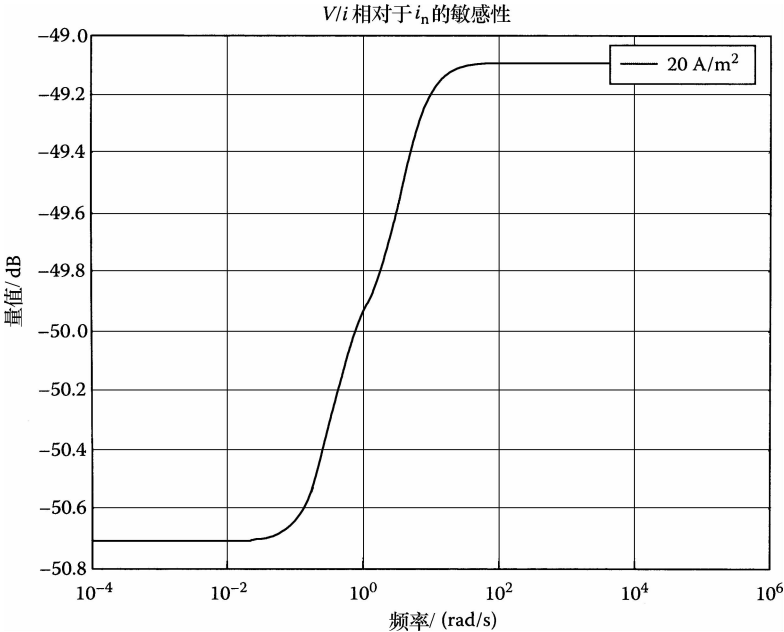


图 3-23 输出阻抗相对于内部电流密度常数 i_n 的敏感性曲线

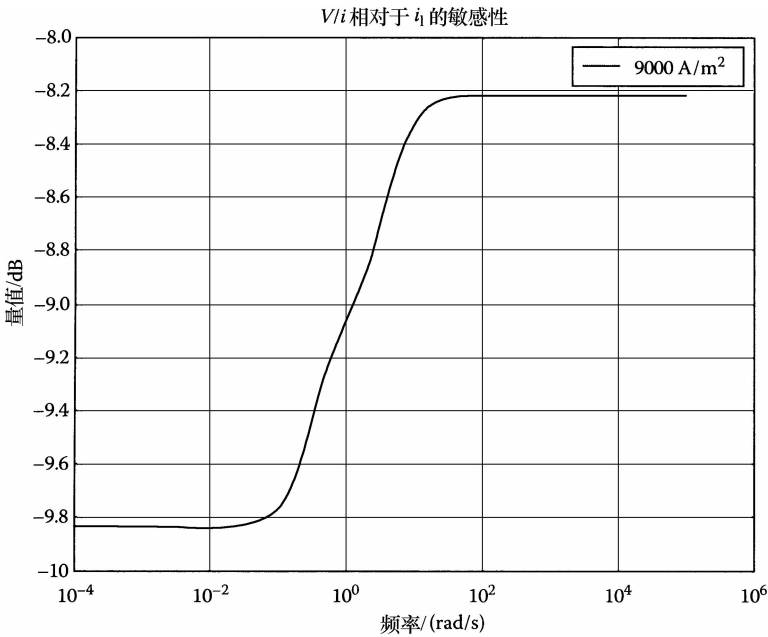


图 3-24 输出阻抗相对于限制电流密度常数 i_l 的敏感性曲线

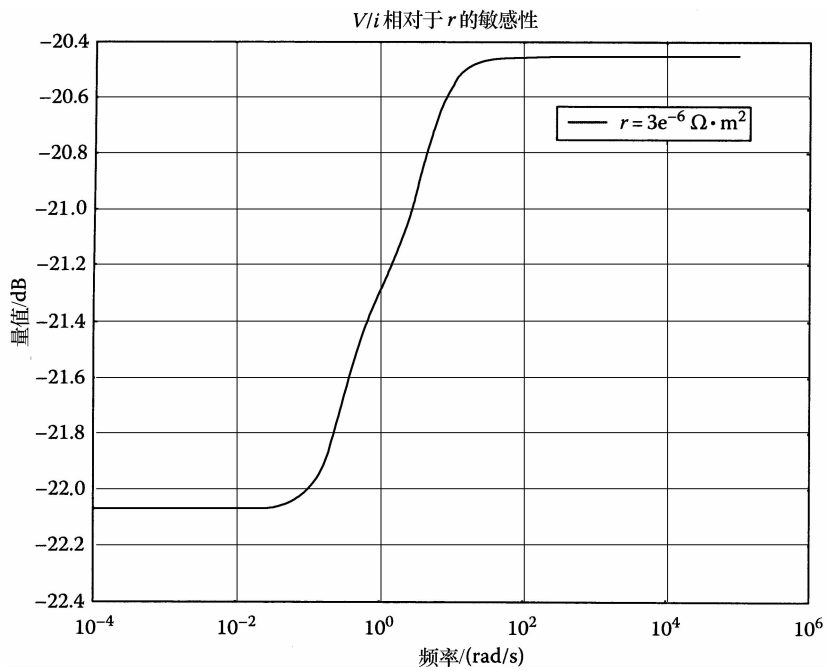


图 3-25 输出阻抗相对于面积比电阻 r 的敏感性曲线

3.7.2 小结

在本节中，我们介绍了文献 [42] 提出的质子交换膜燃料电池线性小信号动态模型，并且对输入输出传递函数进行了敏感性分析。所得到的结果让我们更看清楚了一个重要的设计问题，就是哪个燃料电池参数对电池的动态响应有更大的影响。例如：我们确定了燃料电池在高频率的动态响应通常对阴极体积变化比对阳极体积变化更敏感。这意味着对于高频瞬时的响应，阴极体积比阳极体积是更重要的影响参数。

参 考 文 献

1. A.M. Borbely and J.G. Kreider, *Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium*, New York: CRC Press, 2001.
2. F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, New York: Elsevier Academic Press, 2005.
3. J. Purkrushpan, A.G. Stefanopoulou, and H. Peng, Control of fuel cell breathing, *IEEE Control Systems Magazine*, April 2004.
4. J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, New York: Wiley, 2002.
5. K. Rajashekrara, Propulsion system strategies for fuel cell vehicles, SAE paper 2000-01-0369, 2000.
6. F. Barbir and T. Gomez, Efficiency and economics of PEM fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 22(10/11), 1027–1037, 1997.

7. J. Purkrushpan and H. Peng, *Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis and Feedback Design*, Germany: Springer, London 2004.
8. J. Purkrushpan, A.G. Stefanopoulou, and H. Peng, Modeling and control for PEM fuel cell stack systems, *Proceedings of American Control Conference*, Anchorage, AK, 2002, pp. 3117–3122.
9. J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppy, P.R. Roberge, and A. Rodrigues, Parametric modeling of the performance of a 5-kW proton exchange membrane fuel cell stack, *Journal of Power Sources*, 49, 349–356, 1994.
10. X.D. Xue, K.W.E. Cheng, and D. Sutanto, Unified mathematical modeling of steady-state and dynamic voltage–current characteristics for PEM fuel cells, *Electrochimica Acta*, 52(3), 1135–1144, 2006.
11. M.J. Khan and M.T. Labal, Modeling and analysis of electro chemical, thermal, and reactant flow dynamics for a PEM fuel cell system, *Fuel cells*, 4, 463–475, 2005.
12. Ballard Power System, Inc., Canada, at <http://www.ballard.com>.
13. M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M.S. Alamm, A.A. Sakla, P.C. Byrne, and T. Thomas, Analysis of active and reactive power control of a stand-alone PEM fuel cell power plant, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(4), 2022–2028, 2004.
14. J.J.E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.
15. Woonki Na and Bei Gou, Feedback linearization based nonlinear control for PEM fuel cells, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(1), 179–190, 2008.
16. J. Sun and V. Kolmannovsky, Load governor for fuel cell oxygen starvation protection: A robust nonlinear reference governor approach, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 3(6), 911–913, 2005.
17. S. Basu, M.W. Renfro, and B.M. Cetegen, Spatially resolved optical measurements of water partial pressure and temperature in a PEM fuel cell under dynamic operating conditions, *Journal of Power Sources*, 162(1), 286–293, 2006.
18. L.Y. Chiu, B. Diong, and R.S. Gemmen, An improved small-signal model of the dynamic behavior of PEM fuel cells, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(4), 970–977, 2004.
19. M.J. Khan and M.T. Labal, Dynamic modeling and simulation of a fuel cell generator, *Fuel Cells*, 1, 97–104, 2005.
20. R.E. Sonntag, C. Borgnakke, and G.J.V. Wylen, *Fundamentals of Thermodynamics*, New York: Wiley, 1998.
21. M.P. Nielsen, P. Pedersen, C.A. Andesen, M.O. Christen, and A.R. Korgaard, Design and control of fuel cell system for transport application, Project Report, Aalborg University, 2002.
22. C. Wang, M.H. Nehrir, and S.R. Shaw, Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(2), 442–451, 2005.
23. J.M. Correa, F.A. Farret, and L.N. Canha, An analysis of the dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells using an electrochemical model, *IECON'01, The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vol. 1, pp. 141–146, 2001.
24. C.J. Hatziadoniu, A.A. Lobo, F. Pourboghra, and M. Daneshdoot, A simplified dynamic model of grid connected fuel-cell generators, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(2), 467–473, 2002.
25. A. Sakhare, A. Davari, and A. Feliachi, Fuzzy logic control of fuel cell for stand-alone and grid connection, *Journal of Power Sources*, 135(1–2), 165–176, 2004.

26. J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, and P.R. Roberge, Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell, 1. Mechanistic model development, *Journal of the Electrochemical Society*, 142(1), 1–8, 1995.
27. J.C. Amphlett, E.K. De Oliveira, R.F. Mann, P.R. Roberge, and A. Rodrigues, Dynamic interaction of a proton exchange membrane fuel cell and a lead-acid battery, *Journal of Power Sources*, 65, 173–178, 1997.
28. F. Grasser and A. Rufer, A fully analytical PEM fuel cell system model for control applications, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(6), 1499–1506, 2007.
29. S. Pasricha, M. Keppler, S.R. Shaw, and M.H. Nehrir, Comparison and identification of static electrical terminal fuel cell models, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 22(3), 746–754, 2007.
30. J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, New York: John Wiley & Sons, 2000.
31. R.S. Gemmen, Analysis for the effect of inverter ripple current on fuel cell operating condition, *Journal of Fluids Engineering*, 125(3), 576–585, 2003.
32. S.C. Page, A.H. Anbuky, S.P. Krumdieck, and J. Brouwer, Test method and equivalent circuit modeling of a PEM fuel cell in a passive state, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 22(3), 764–773, 2007.
33. M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M.S. Alam, A.A. Sakla, P.C. Byrne, and T. Thomas, Analysis of active and reactive power control of a stand-alone PEM fuel cell power plant, *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(4), 2022–2028, 2004.
34. M. Uzunoglu and M.S. Alam, Dynamic modeling, design, and simulation of a combined PEM fuel cell and ultracapacitor system for stand-alone residential applications, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 21(3), 767–775, 2006.
35. S. Pasricha and S.R. Shaw, A dynamic PEM fuel cell model, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 21(2), 484–490, 2006.
36. J.M. Correa, F.A. Farret, L.N. Canha, and M.G. Simoes, An electrochemical-based fuel-cell model suitable for electrical engineering automation approach, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(5), 1103–1112, 2004.
37. J.M. Correa, F.A. Farret, V.A. Popov, and M.G. Simoes, Sensitivity analysis of the modeling parameters used in simulation of proton exchange membrane fuel cells, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(1), 211–218, 2005.
38. BCS Technology Co., *Data Sheet for a 500 W FC Stack*, 2001.
39. L. Lorandi, E. Hernandez, and B. Diong, Parametric sensitivity analysis of fuel cell dynamic response, *SAE Transactions Journal of Aerospace*, 113, 2024–2032, 2004.
40. E. Hernandez, Parametric sensitivity analysis and circuit modeling of PEM fuel cell dynamics, MS thesis, University of Texas at El Paso, December 2004.
41. R.S. Gemmen, E. Liese, J.G. Rivera, and J. Brouwer, Development of dynamic modeling tools for solid oxide and molten carbonate hybrid fuel cell gas turbine systems, *Proceedings of the ASME/IGTI Turbo Expo*, 2000.
42. K. Sedghisigarchi and A. Feliachi, Control of grid-connected fuel cell power plant for transient stability enhancement, *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, pp. 383–388, 2002.
43. E. Liese, and R.S. Gemmen, Dynamic modeling results of a 1 MW molten carbonate fuel cell/gas turbine power system, *Proceedings of the ASME/IGTI Turbo Expo*, pp. 341–349, 2002.

第4章 燃料电池的线性和非线性控制设计

4.1 简介

基于燃料电池的发电系统为控制和系统集成提出了许多挑战性的问题。现在已经有相当多的针对燃料电池运作和系统，特别是针对质子交换膜燃料电池的移动和固定应用方面的研究和开发工作。控制系统对燃料电池的运行和系统至关重要。控制系统的目的是在不确定情况下和干扰情况下，调节燃料电池电化学反应器的自然响应使其能按预期运行。此外，控制系统还会尝试诊断异常操作，监视电池堆健康状况，并调节运行以适应材料和电极的老化。因为燃料电池系统要在很大范围条件下运行，这使控制更具挑战性。

由于燃料电池系统的复杂性，控制方案要用于各个方面，包括压缩机的电动机控制、压力控制、湿度控制、温度控制、比例控制、输出电压和电流控制等等。在文献中，已经有线性和非线性控制法研究的报告。本章将介绍质子交换膜燃料电池的线性和非线性控制设计，及相应的燃料电池模型。

4.2 燃料电池的线性控制设计

一个强大的控制方案是满足质子交换膜燃料电池高功率密度需求的关键。在这一节中，我们将介绍基于燃料电池分布参数模型的线性比例控制方案，其中包含了空间变化效应。

4.2.1 燃料电池的分布参数模型

图4-1显示了文献[1]提出的燃料电池分布参数模型。在模型中，燃料电池是沿着通道被模拟的。该模型考虑到了固体和两个气体通道之间的热交换，以及固体和冷却水之间的热交换；也模拟了水含量，以便计算冷凝和蒸发水、通过电解质膜的水和在阴极生成的水。固体能量平衡是按动态模拟的，而且对于给定固体温度曲线，所有其他方程都假设是准稳态的。

根据文献[1, 2]的工作，能量平衡方程^[3]是

$$\begin{aligned} \rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = & k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{U_g A_g}{f} (T_a + T_c - 2T_s) + \frac{U_w A_{cool}}{f} (T_{cool} - T_s) - \frac{e}{f} \left(\frac{\Delta H}{2F} + V_{cell} \right) \\ & + \frac{1}{f} \Delta H_{vap}(T_s) \left(\frac{dM_{w,a}^1(x)}{dx} + \frac{dM_{w,c}^1(x)}{dx} \right) \end{aligned}$$

边界条件如下：

$$\left. k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=0} = U_C (T_s - T_{inf})$$
$$\left. k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=L} = -U_C (T_s - T_{inf})$$

V_{cell} 给出如下：

$$V_{cell} = V_{OC} + \frac{RT_s}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) - \frac{RT_s}{F} \ln \left(\frac{I(x)}{i_0 P_{O_2}(x)} \right) - \frac{I(x) t_m}{\sigma_m(x)}$$

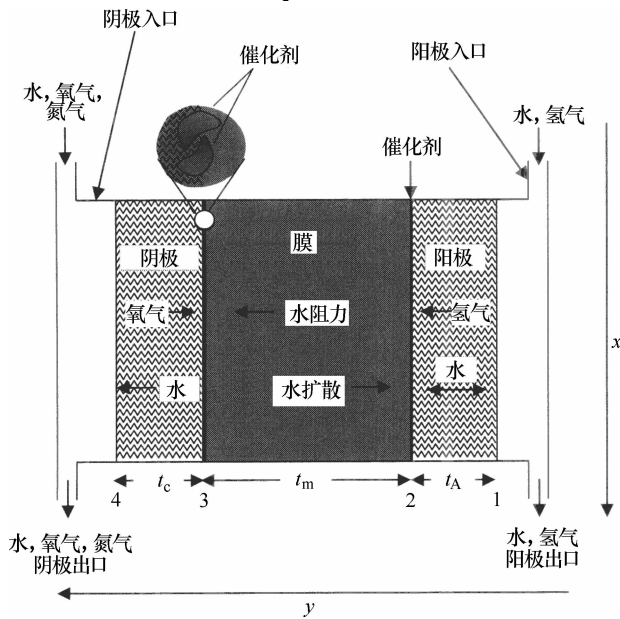


图 4-1 燃料电池通道的示意图

4.2.2 燃料电池的线性控制设计和模拟

4.2.2.1 功率控制回路

功率控制回路通过操控入口氢气和氧气摩尔流率来控制燃料电池的平均功率密度。在这里，我们将只涉及使用入口氢气摩尔流率的控制^[3]。

图 4-2 所示为控制方案。根据基于内模控制的比例积分微分法（Proportional Integral Derivative, PID），设计了操控氢气流率的功率密度回路控制器。由此产生的控制器是比例积分形式的。图 4-3 所示为随着操纵变量变化的比例积分控制器性能。这个控制方案的调节时间约为 275s。调节时间这么长的原因是质子交换质膜燃料电池的严重非线性。

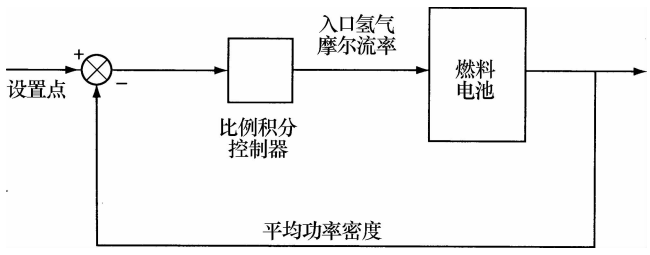


图 4-2 用氢气入口摩尔流率做操控变量的功率控制回路示意图

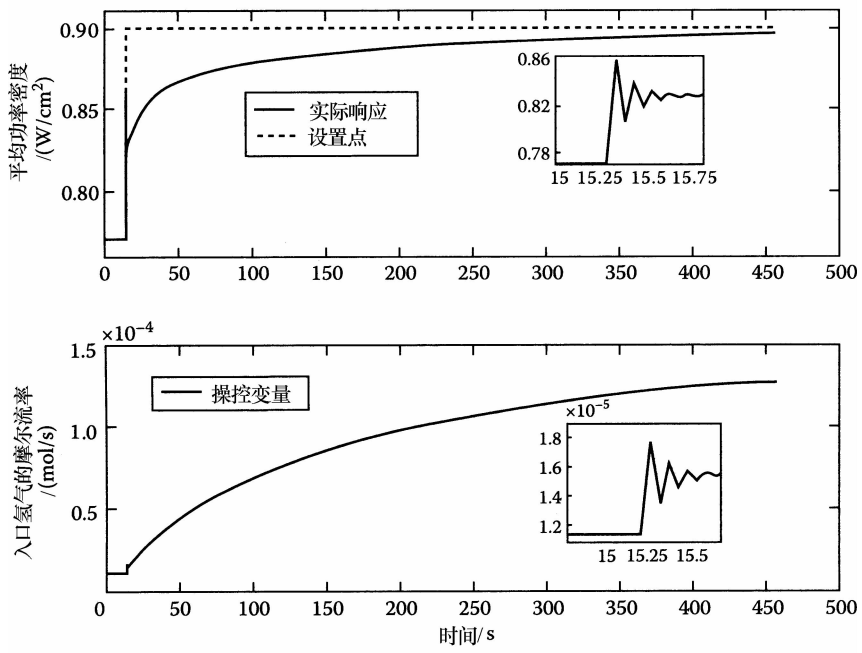


图 4-3 用氢气入口摩尔流率做操纵变量的功率控制回路的性能

4.2.2.2 功率和固体温度的控制回路

为了达到最大功率密度，化学反应速率必须保持在一个较高的水平。然而，高的反应速率会增加反应中的生热，最终导致燃料电池固体温度升高。而固体温度升高超过一个特定温度时，会影响膜的电导率和催化剂的活性，从而影响反应速率。因此，必须把平均固体温度控制在规定限额内。

图 4-4 所示为线性控制设计方案。为了控制固体平均温度，稳态相对增益阵列分析建议我们使用冷却剂入口摩尔流率作为操控变量。级联控制回路使用冷却剂摩尔入口流率作为操控变量（图 4-4）可以控制固体平均温度。图 4-4 的方案提供了额外的抗干扰优点。图 4-5 是级联控制设计回路的性能。在文献 [3] 中可以找到进一步模拟的结果。

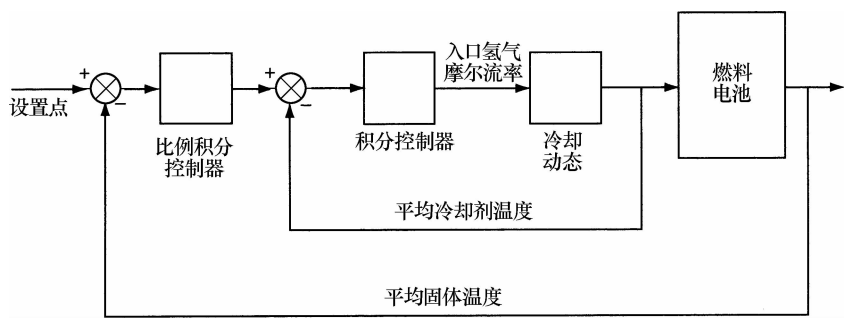


图 4-4 用冷却剂入口摩尔流率做操控变量的级联控制回路示意图

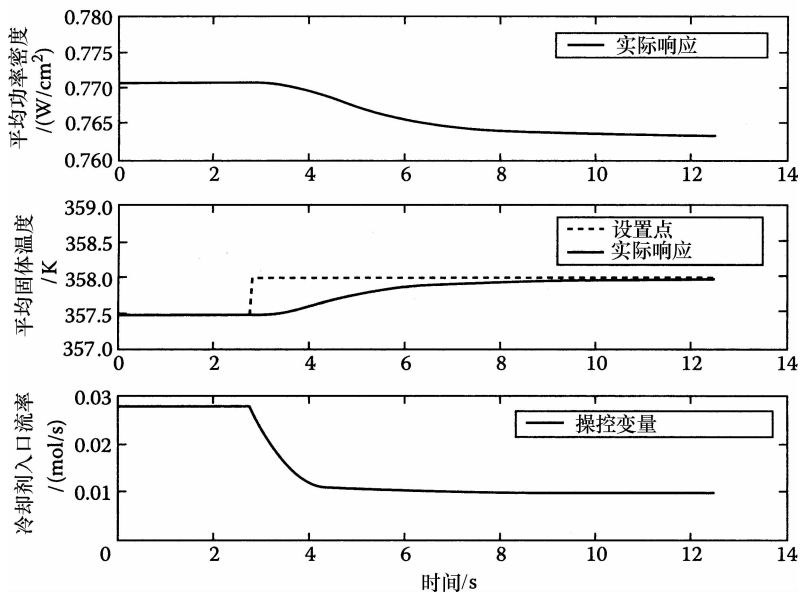


图 4-5 用冷却剂入口摩尔流率做操控变量的级联控制回路的性能

4.2.2.3 多输入输出的控制方案

我们可以把质子交换膜燃料电池看成一个多输入多输出（Multi-Input and Multi-Output, MIMO）系统，把其中的平均功率密度和平均固体温度当做两个控制输出。图 4-6 所示是多输入多输出控制。

图 4-7 显示了多输入输出控制器比单输入单输出（Single-Input and Single-Output, SISO）控制器的响应快。多输入输出控制器的调节时间约为 90s，而单输入单输出控制器的调节时间约为 275s。此外，多输入输出控制方案也避免了不必要的温度升高影响。

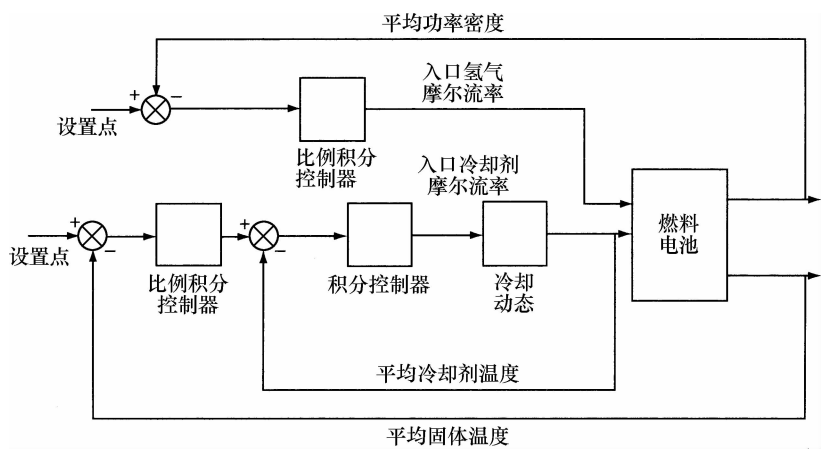


图 4-6 多输入输出控制示意图

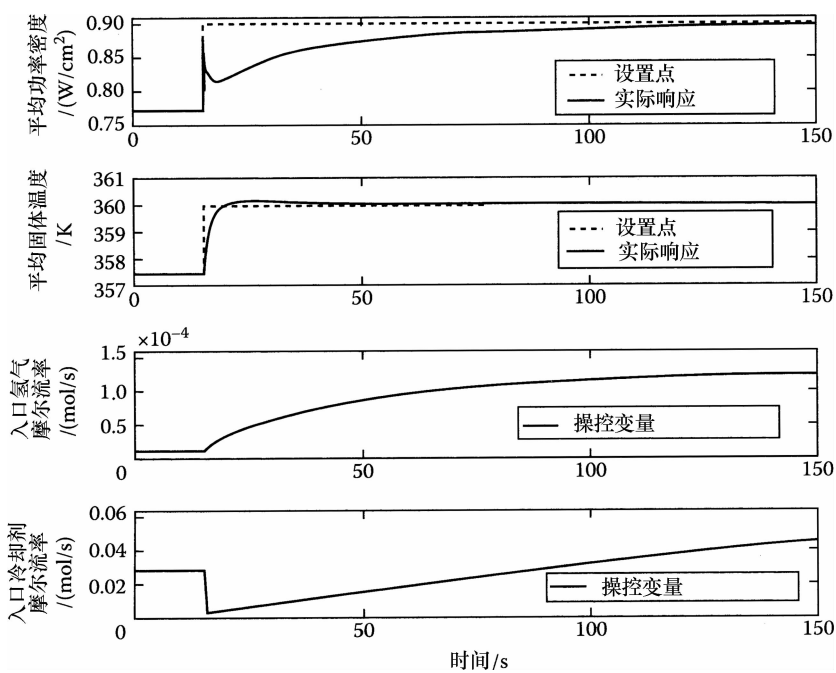


图 4-7 提议的多输入输出控制方案

平均功率密度和平均固体温度对设置点变化的响应

图 4-8 所示是在阴极用空气代替氧气的模拟性能。结果表明，多输入输出控制方案可以为氢气-空气燃料电池提供令人满意的控制性能。

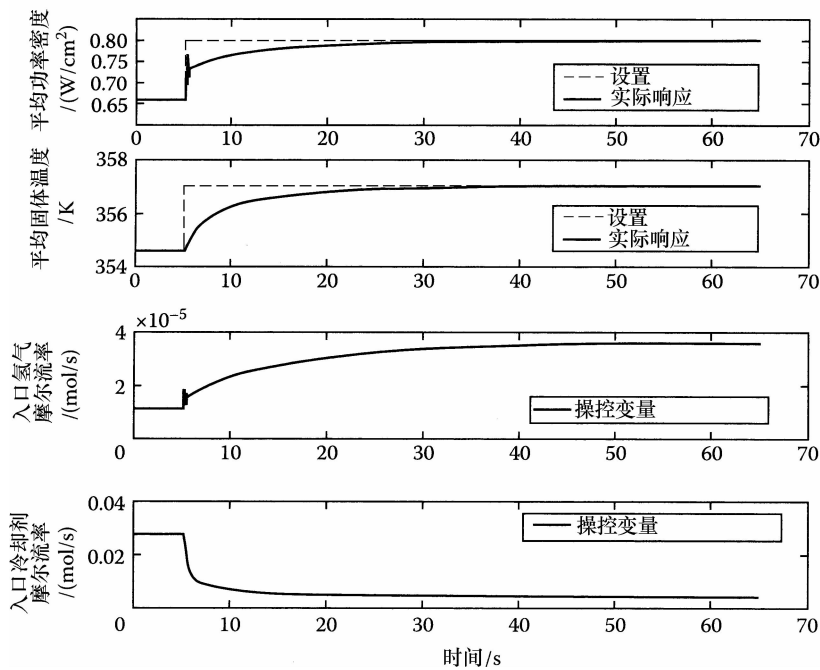


图 4-8 多输入输出控制方案

当在阴极使用空气时，平均功率密度和平均固体温度对设置点变化的响应

4.2.2.4 比例控制

在文献 [3] 中所述的研究，实现了一个比例控制方案来避免氧气缺乏问题，并且满足了最大功率密度需求。在比例控制设计中，入口的氧气摩尔流率被当做一个依赖操纵变量，它无论如何改变都与入口的氢气摩尔流率保持一个固定的比例。

图 4-9 所示为比例控制设计的示意图。在这一方案中，测量的操控变量是入口氢气摩尔流率。入口氧气流率按着比例随入口氢气摩尔流率变化。

图 4-10 显示了比例控制方案的性能。为了提高比例控制的性能，也使用了前面介绍的级联控制方案来控制平均固体温度。模拟结果表明，这个比例控制器的响应速度比仅用氢气做操控变量的多输入输出方案更快。比例控制器之所以快，是因为在循环结束时，初始输入的氧气摩尔流率比基准流率低。图 4-11 显示了在提议的比例控制方案中，氧气缺乏的问题可以通过增加氧气输入摩尔流率来避免。

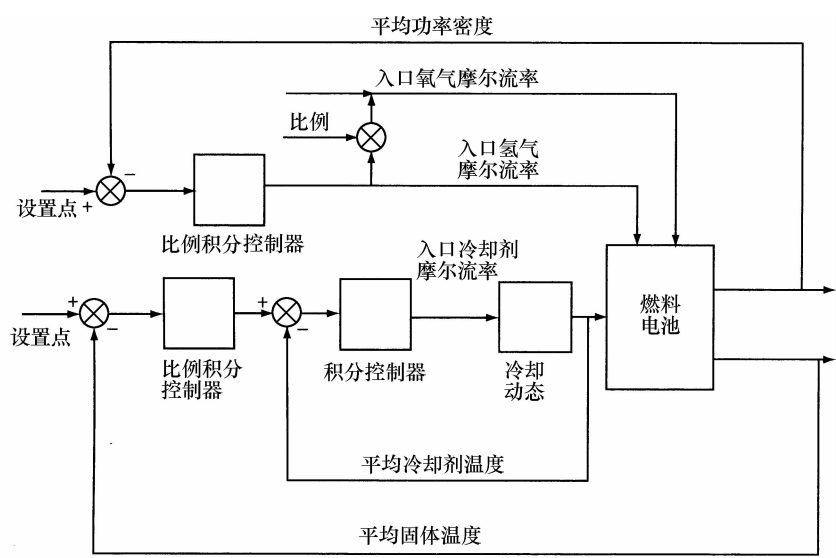


图 4-9 流率比例控制和温度级联控制示意图

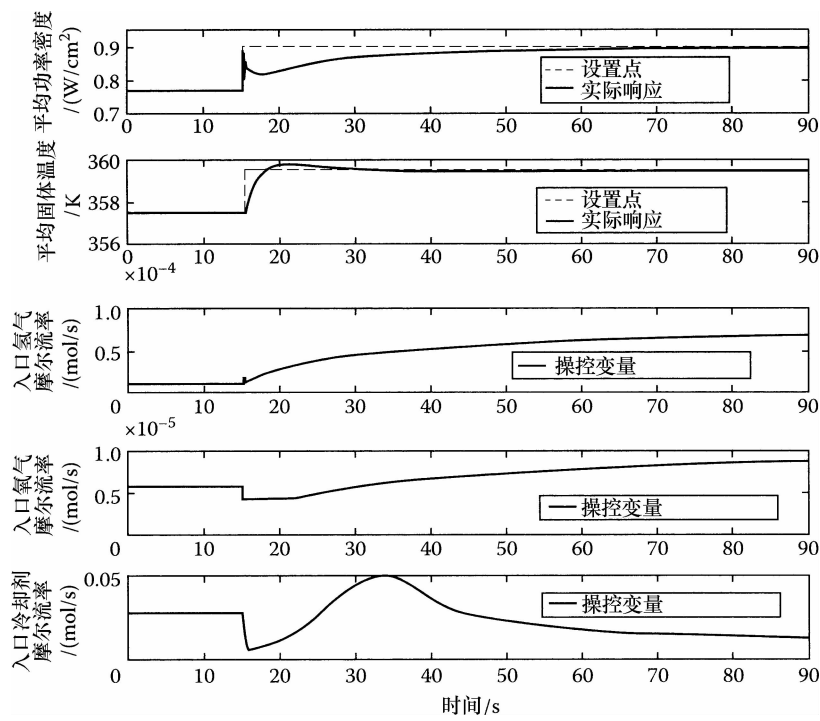


图 4-10 多输入输出控制器性能随平均功率密度和平均固体温度设置点变化的响应
其中氧气使用比例控制

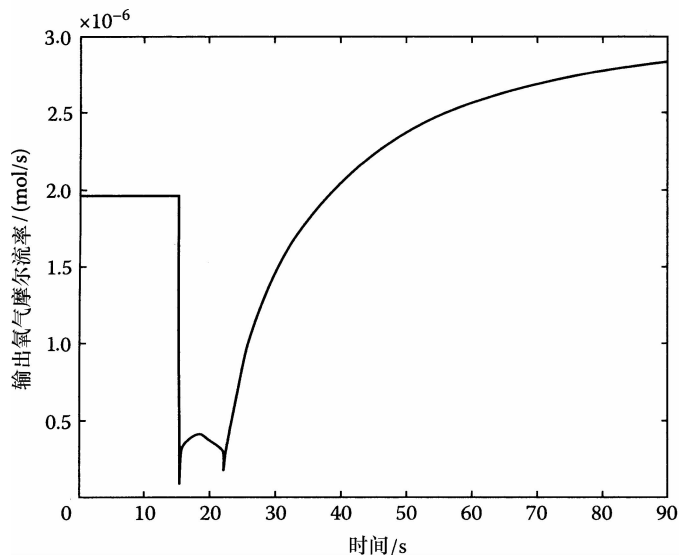


图 4-11 从比例控制的燃料电池的输出氧气流率
对应于图 4-27 所示的结果

4.3 燃料电池的非线性控制设计

在本节我们会推导燃料电池的多输入输出非线性动态模型，然后用反馈线性化设计非线性控制器，来减少氢气和氧气之间的分压差 ΔP 。保持 ΔP 在一定小的范围内，主要是为了保护膜不受损伤，从而延长燃料电池堆的寿命^[4,5]。此外，压力比其他参数对燃料电池性能的影响更大^[4,5]。因为燃料电池的电压是压力的函数，所以我们需要适当地控制每个压力，以避免有害的燃料电池电压降。为了达到这一目的，我们必须使用精确阀控制器这样的精确执行器来尽量减少阳极和阴极之间的压力差。在通常情况下，最优压力控制器由压力传感器和电磁流率控制阀组成。在这本书中，我们主要是为整个燃料电池系统设计压力控制算法，而不是设计燃料电池内部的压力传感器和流率控制器。此外，因为电压-电流极化曲线的特性使很短时间内的电压控制难以执行，所以我们不把燃料电池的电压当成控制输出。通常燃料电池系统需要辅助的能源储存装置来实现短时间内的电压控制。因此，我们只选择氢气和氧气分压作为控制输出，而把电池堆电流看做对系统的干扰，而不是外部输入^[5]。

考虑下面有小波动的多输入输出非线性系统：

$$\begin{aligned}
\dot{X} &= f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x) u_i + p(x) d, i = 1, 2, \dots, m \\
y_1 &= h_1(x) \\
&\vdots \\
y_m &= h_m(x)
\end{aligned} \tag{4-1}$$

式中

$x \in R^n$ ——状态向量;

$[u_1, u_2, \dots, u_m] = U \in R^m$ ——输入或控制向量;

$y \in R^p$ ——输出向量;

$f(x)$ 和 $g_i(x)$, $i = 1, 2, \dots, m$ —— n 维光滑向量场;

d ——小波动变量;

$p(x)$ ——与小波动直接相关的空间向量场。

考虑下面有小波动的多输入输出非线性系统, 燃料电池的非线性动态系统模型可以改写如下:

$$\begin{aligned}
\dot{X} &= f(x) + g_1(x) u_1 + g_2(x) u_2 + p(x) d \\
\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4-2}$$

式中

$$X = \begin{bmatrix} P_{H_2} \\ P_{H_2O_A} \\ P_{O_2} \\ P_{N_2} \\ P_{H_2O_C} \end{bmatrix}; U = \begin{bmatrix} u_a \\ u_c \end{bmatrix}; \gamma = \begin{bmatrix} P_{H_2} \\ P_{O_2} \end{bmatrix}; d = I_{\text{fc}}$$

$$f(x) = 0;$$

$$g_1(x) = RT \cdot \lambda_{H_2} \begin{bmatrix} \frac{k_a \cdot \gamma_{H_2}}{V_A} - \frac{k_a}{V_A} \frac{x_1}{x_1 + x_2} \\ \frac{k_a \cdot \varphi_a P_{vs}}{V_A (x_1 + x_2 - \varphi_a P_{vs})} - \frac{k_a}{V_A} \frac{x_1}{x_1 + x_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$g_2(x) = RT \cdot \lambda_{\text{air}} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_c \cdot \gamma_{\text{O}_2}}{V_c} - \frac{k_c}{V_c} \frac{x_3}{x_3 + x_4 + x_5} \\ \frac{k_c \cdot \gamma_{\text{N}_2}}{V_c} - \frac{k_c}{V_c} \frac{x_4}{x_3 + x_4 + x_5} \\ \frac{k_c \cdot \varphi_c P_{\text{vs}}}{V_c (x_3 + x_4 + x_5 - \varphi_c P_{\text{vs}})} - \frac{k_c}{V_c} \frac{x_5}{x_3 + x_4 + x_5} \end{bmatrix}$$

$$p(x) = RT \begin{bmatrix} -\frac{C_1}{V_A} + \frac{C_1 \cdot x_1}{V_A (x_1 + x_2)} \\ \frac{C_1 \cdot x_2}{V_A (x_1 + x_2)} - \frac{C_1}{V_A} \\ -\frac{C_1}{2V_c} + \frac{C_1 \cdot x_2}{2V_c (x_3 + x_4 + x_5)} \\ 0 \\ -\frac{C_1}{V_c} - \frac{C_1 \cdot x_5}{V_c (x_3 + x_4 + x_5)} - \frac{C_2 \cdot x_5}{V_c (x_3 + x_4 + x_5)} + \frac{C_2}{V_c} \end{bmatrix}$$

式 (4-2) 暗示了系统的输入输出性能是非线性的和耦合的。我们必须采取两个步骤才能达到控制目的:

- 不仅可以得到补偿非线性, 而且可以得到把输入和输出性能去耦并线性化的非线性控制律。
- 在闭路中放入奇异点, 当加入比例积分控制器后, 可以使输出 P_{H_2} 和 P_{O_2} 按期望的轨迹渐近跟踪。

式 (4-2) 提供了一个多输入输出非线性系统, 使我们可以求出非线性控制律。在通常情况下, 不能在控制设计中直接使用式 (4-2) 中的小波动 d , 因为必须先满足额外的必要条件, 即能够测量干扰而且不允许有前馈作用^[6,7]。否则, 新输入 v 和输出 y 之间的线性映射不存在。使用干扰的测量, 这个条件给出下面的控制律:

$$U = -A^{-1}(x)b(x) + A^{-1}(x)v - A^{-1}(x)p(x)d \quad (4-3)$$

如式 (4-2) 所示, $f(x) = 0$ 导致 $b(x) = L_f^r h(x) = 0$, 所以控制律可以写成

$$U = A^{-1}(x)v - A^{-1}(x)p(x)d \quad (4-4)$$

由于在对每个 $y_1 = x_1$ 和 $y_2 = x_3$ 求一阶导数后, 每个控制变量 u 才显露出来, 相对度向量 $[r_1 r_2]$ 是 $[1 \ 1]$, 而去耦矩阵 $A(x)$ 被定义为

$$A(x) = \begin{bmatrix} L_{g1}h_1(x) & L_{g2}h_1(x) \\ L_{g1}h_2(x) & L_{g2}h_2(x) \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

式中

$$A(x) = \begin{bmatrix} \frac{k_a \cdot \gamma_{H_2} \cdot \lambda_{H_2}}{V_A} - \frac{k_a \cdot \lambda_{H_2}}{V_A} \frac{x_1}{x_1 + x_2} & 0 \\ 0 & \frac{k_c \cdot \gamma_{O_2} \cdot \lambda_{air}}{V_C} - \frac{k_c \cdot \lambda_{air}}{V_C} \frac{x_3}{x_3 + x_4 + x_5} \end{bmatrix}$$

在 $x = x_0$ 点非奇异。此外, 式 (4-4) 中的矩阵 v 和 $p(x)$ 给出如下:

$$v = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix}; p(x) = RT \begin{bmatrix} -\frac{C_1}{V_A} + \frac{C_1 \cdot x_1}{V_A(x_1 + x_2)} \\ -\frac{C_1}{2V_C} + \frac{C_1 \cdot x_2}{2V_C(x_3 + x_4 + x_5)} \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

式 (4-4) 给出的控制律使输入输出性能去耦并线性化 (见图 4-1):

$$\begin{aligned} \dot{P}_{H_2} &= v_1 \\ \dot{P}_{O_2} &= v_2 \end{aligned} \quad (4-7)$$

输出 P_{H_2} 和 P_{O_2} 按照新输入 v_1 和 v_2 是去耦的。因此, 在输入 v_1 和氢分压 $y_1 = P_{H_2}$ 之间, 在输入 v_2 和氧分压 $y_2 = P_{O_2}$ 之间, 可以得到两个线性子系统。此外, 注意 $\dot{y}_1 = \dot{x}_1$ 和 $\dot{y}_2 = \dot{x}_3$, 所以为了确保 y_1 和 y_2 被调整成 $y_{1,s}$ 和 $y_{2,s}$ 的期望值 3atm ($1\text{atm} = 0.1\text{MPa}$), 我们要用线性控制理论的极点配置方案来设计稳定控制器 [8]。新的控制输入给出如下

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y}_{1,s} - k_{11}e_1 \\ \dot{y}_{2,s} - k_{21}e_2 \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

式中 $e_1 = y_1 - y_{1,s}$ 而且 $e_2 = y_2 - y_{2,s}$ 。

尽管可以通过反馈线性化把非线性燃料电池系统精确线性化, 但是在参数变化中, 特别是当负载变化时, 有可能存在跟踪误差。如文献 [7, 8] 所示, 为了消除这种跟踪误差, 我们在闭环误差方程中加入了积分项:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y}_{1_s} - k_{11}e_1 - k_{12}\int e_1 dt \\ \dot{y}_{2_s} - k_{21}e_2 - k_{22}\int e_2 dt \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

从式 (4-9)，可以得到如下误差动态性能：

$$\begin{aligned} \ddot{e}_1 + k_{11}\dot{e}_1 + k_{12}e_1 &= 0 \\ \ddot{e}_2 + k_{21}\dot{e}_2 + k_{22}e_2 &= 0 \end{aligned} \quad (4-10)$$

适当选择 $s^2 + k_{11}s + k_{12}$ 和 $s^2 + k_{21}s + k_{22}$ 的特征根，可以实现渐进跟踪，所以当 $t \rightarrow \infty$ 时， $P_{H_2} \rightarrow y_{1_s}$ ，而且 $P_{O_2} \rightarrow y_{2_s}$ 。选择 $k_{11}^2 \gg 4k_{12}$ 和 $k_{21}^2 \gg 4k_{22}$ 也可以减少过冲。

如图 4-12 所示，这个控制方案的主要目的是通过适当定义一个变换映射来设计非线性控制器。这个映射可以把原来的非线性系统变换成线性可控（封闭）系统，再使用极点配置技术达到跟踪目的，然后就可以设计线性控制器。然而，我们将无法观察到式 (4-4) 中的控制律，因为整个动态有五个元素 (P_{H_2} ， $\dots$ ， $P_{H_2O_c}$)，而只有两个元素 (P_{H_2} 和 P_{O_2}) 在输出中可以观察到。因此，它可能有内部动态的问题。换句话说， $P_{H_2O_A}$ 、 P_{N_2} 和 $P_{H_2O_c}$ 的内部动态必须是稳定的，这样在跟踪时，式 (4-9) 中跟踪控制器的状态才能被限制在有界区域内。否则，因为外部和内部动态，这种控制法不能提高整体系统性能。然而，很难直接确定系统的内部动态，因为它非线性的、非自治的，并且耦合到外部闭环动态中，这也可以从式 (4-1) 到式 (4-10) 看到。这里我们用模拟来验证每个状态是否在有界区域内^[9]。我们通过比较模拟结果和实验数据^[10]来验证控制律的性能。

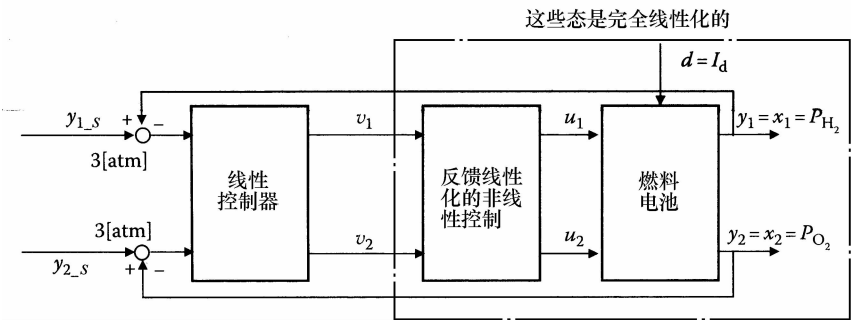


图 4-12 质子交换膜燃料电池的总体控制框图

4.4 接口的非线性控制设计

为了设计燃料电池非线性控制器的接口，特别是在燃料电池汽车系统的设计中，必须考虑几个主要组成部分。下面是燃料电池汽车的主要组成部分^[11]：

- 燃料电池处理器：汽油或甲醇转化器（如果直接使用氢气，需要储氢罐）。
- 燃料电池堆：可以发电（包括空气压缩机为燃料电池提供高压氧气）。
- 冷却系统：可以保持适当的工作温度。
- 水管理系统：可以管理系统中的湿度和水分，保持燃料电池膜充满水，并同时防止水累积在阴极。
- 直流-直流转换器：可以调节燃料电池堆的输出电压。
- 逆变器系统：可以把直流电转换成可变电压和可变频率的交流电来驱动电动机。
- 电池或超级电容：可以为系统启动提供补充电力，也可以存储在减速中剩余的能量。为了管理功率，可以在直流-直流转换器和电池之间使用双向转换器。

在图 4-13 中可以看到，如果使用甲醇或汽油，而不是直接使用氢气，转化器前需要有燃料储存罐；如果直接使用氢气，需要有储氢罐。为了安全无害，这两个储存罐应尽可能小，而且可以放入车内。

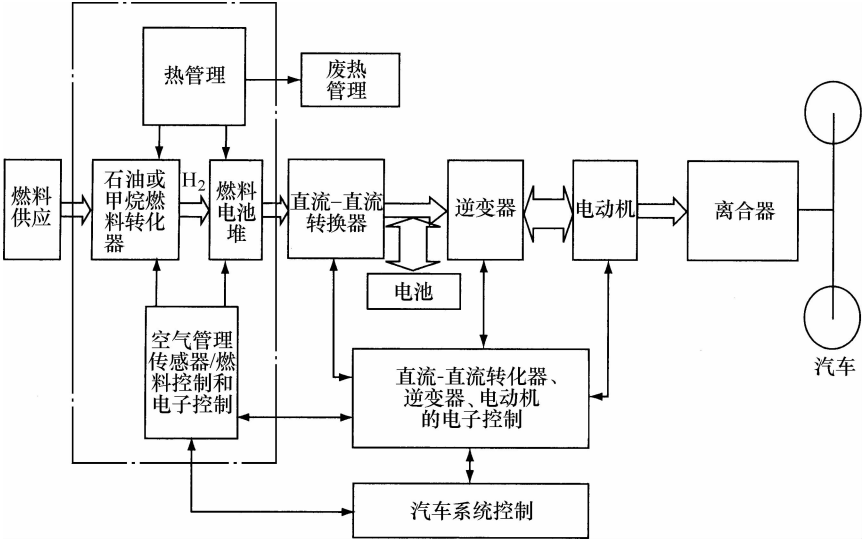


图 4-13 一个典型的燃料电池汽车系统（出自 Rajashekrara, K., *Propulsion system strategies for fuel cell vehicles*, SAE paper 2000-01-0369. 许可使用）

当功率需求高时，例如加速时，电池会提供所需要的功率。当功率需求低时，燃料电池会发电为电池充电。图 4-14 所示为燃料电池的转换器控制系统。在图 4-14 中，直流-直流升压转换器把燃料电池的电压提高到驱动逆变器所需 300V。直流-直流转换器必须根据燃料电池堆最大功率容量设计。为了防止逆向电流流入电池堆，导致燃料电池堆的损坏，在燃料电池堆的输出使用了一个阻流二极管。

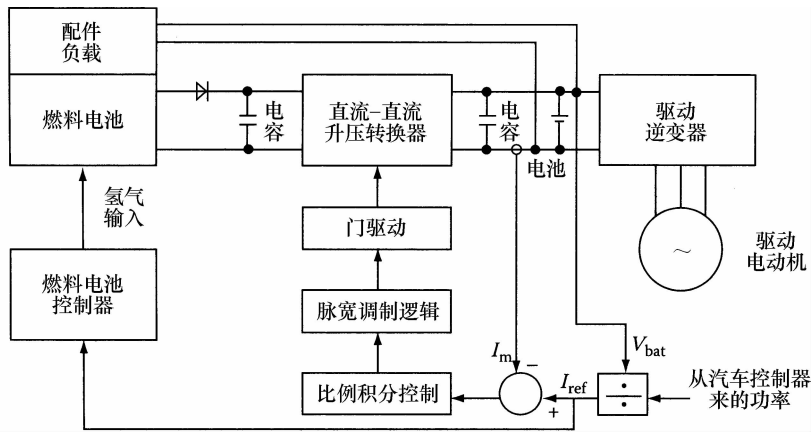


图 4-14 燃料电池的转换器控制系统

从汽车控制器来的功率除以电池电压后，产生参考电流，用于直流-直流升压转换器和燃料电池控制器。在直流-直流升压转换器中，参考电流与实测电流进行比较用来计算控制直流-直流升压转换器输出功率的占空比。根据电池电压的变化，燃料电池的输出功率可以在很大范围内变化。在燃料电池控制器里，由于燃料电池的输出功率与氢气和氧气的流率都成正比，在所有运行条件下，控制器都有很宽的频带可以稳定系统^[11]。因此，为了在很大范围内有恒定功率输出，文献 [11] 提出了改进的燃料电池转化器系统。通过直接测量图 4-15 中燃料电池的电流，并且把它与参考电流相比较，可以用这两个电流之间的误差来推导直流-直流转换器的占空比，然后得到恒定的电流和电压。因此在很大范围内，功率可以保持不变，并且系统是稳定的。

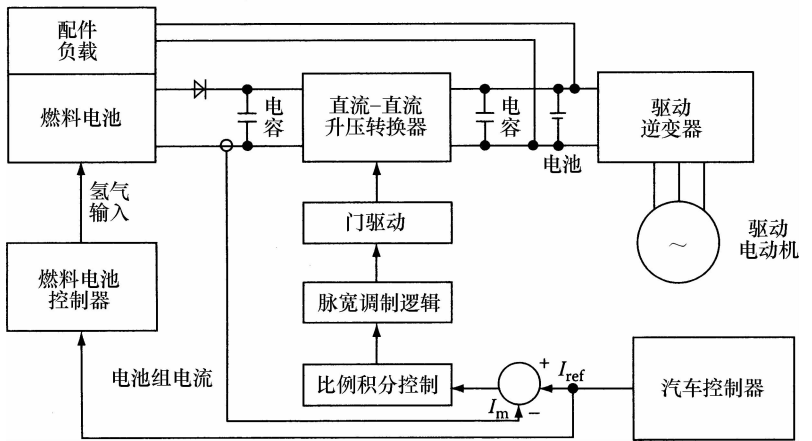


图 4-15 改进的燃料电池转化器控制系统（出自 Rajashekrara, K., *Propulsion system strategies for fuel cell vehicles*, SAE paper 2000-01-0369. 许可使用）

4.5 控制设计分析

我们把几个非线性控制法与比例积分微分 (PID) 控制器相比较, 后者用于控制输入氢气和氧气的气体压力回路。这其中有控制两种输入气体的反馈线性化非线性控制^[12]和控制气体压力的神经网络最优控制 (Neural network-based Optimal Control, NOC)。有关这些控制设计的更多详情可参考文献 [13]。如图 4-16 所示, 使用燃料电池模型中的电化学和热力学关系以及神经网络最优控制方案, 我们建立了动态的 MATLAB / Simulink 模型。在这个模型中, 燃料电池有 4 个输入。图 4-17 是比例积分微分压力控制的 Simulink 模型^[13]。根据图 4-18 和 4-19 的模拟结果, 神经网络最优控制可以用以下式自动调节增益,

$$U(t) = \alpha \cdot (V_{\text{ref}}(t) - V(t))^2 + \beta \cdot (P_{\text{H}_2}(t) - P_{\text{H}_2}(t-1))^2 \quad (4-11)$$

代价准则 $U(t)$ 显示了我们必须尽量减小期望状态与实际状态之间的误差。从式 (4-11) 可以看到, 需要微调参数 α 和 β , 才能使代价最小。

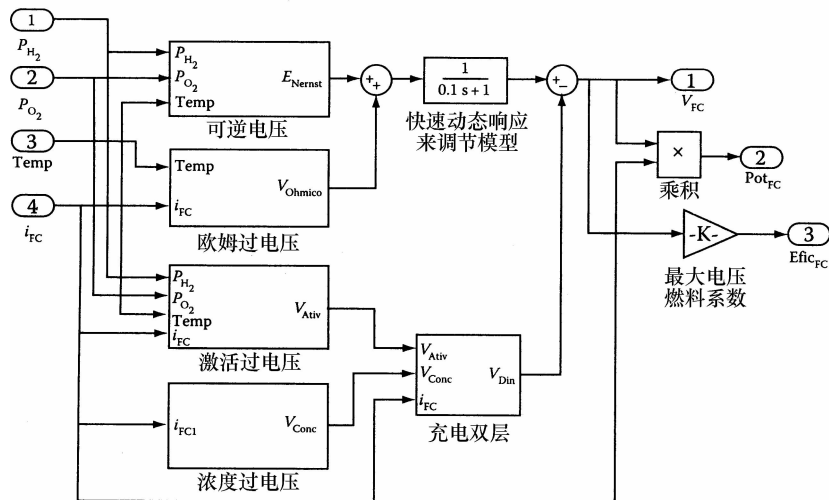


图 4-16 动态 MATLAB / Simulink 的燃料电池模型 (出自 Anderson, C. A. et al., *Design and control of fuel cells system for transport application*, Aalborg University, Project Report, 2002. 许可使用)

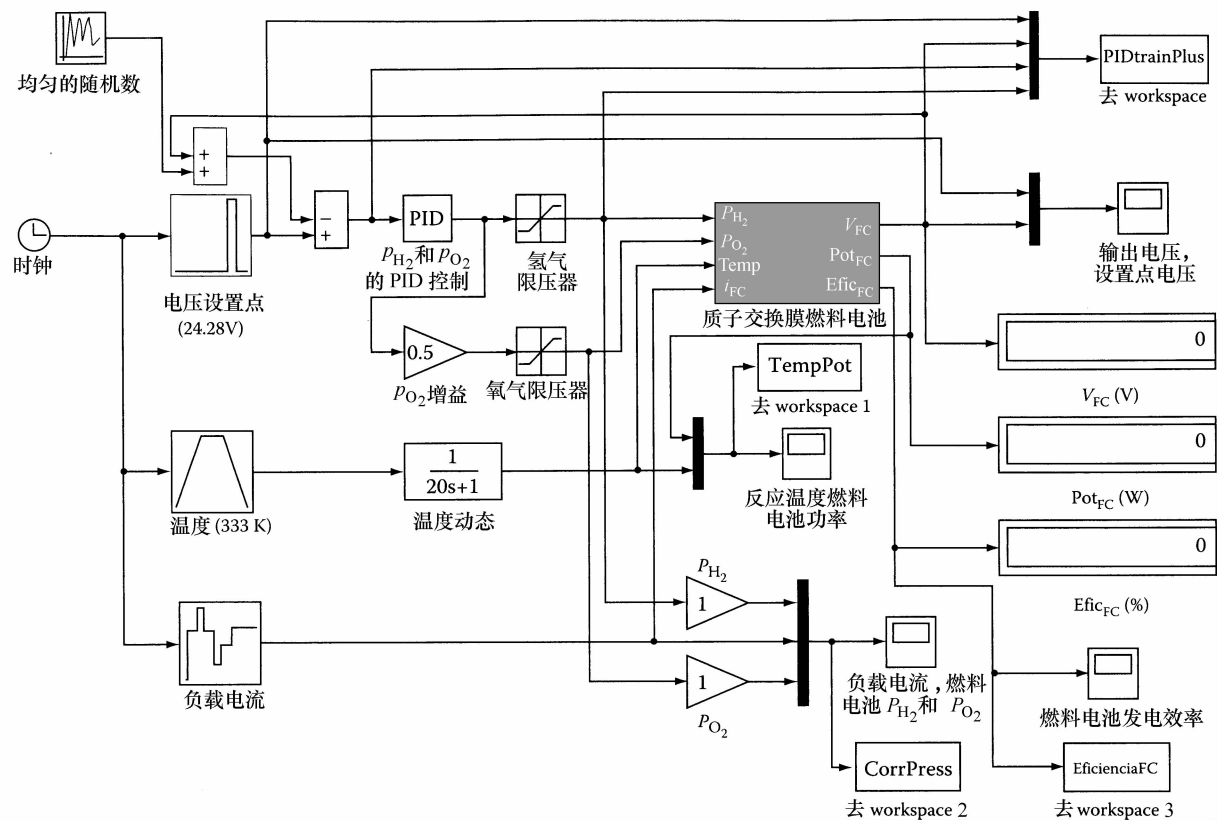


图 4-17 比例积分微分压力控制

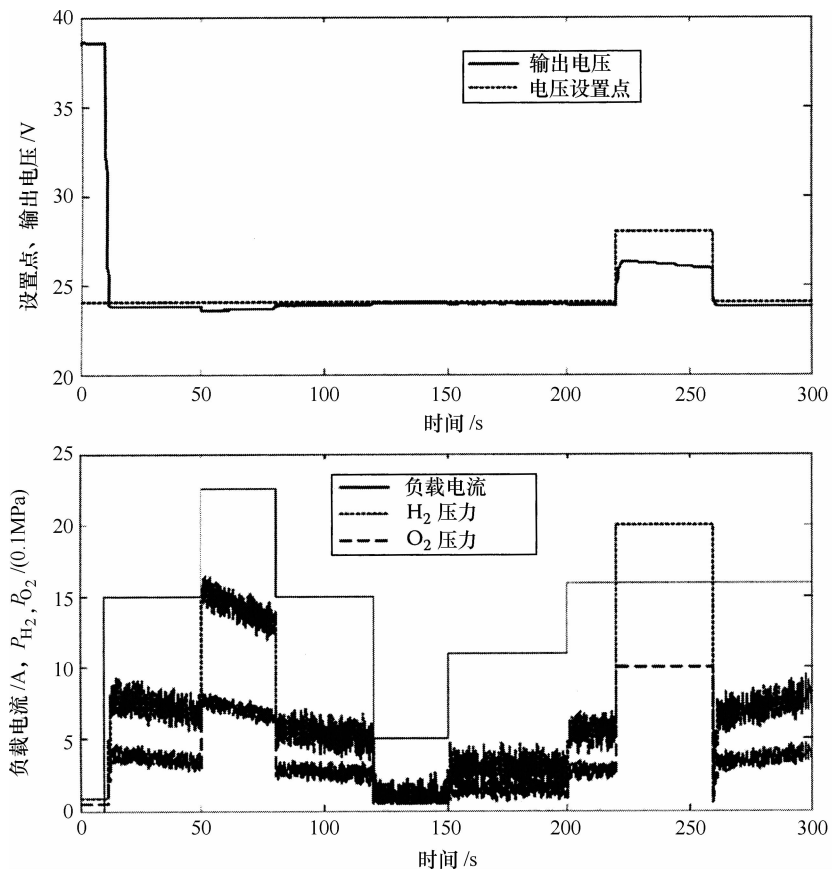


图 4-18 燃料电池的比例积分微分控制：设置点、输出电压、
氢气压力、氧气压力和负载电流

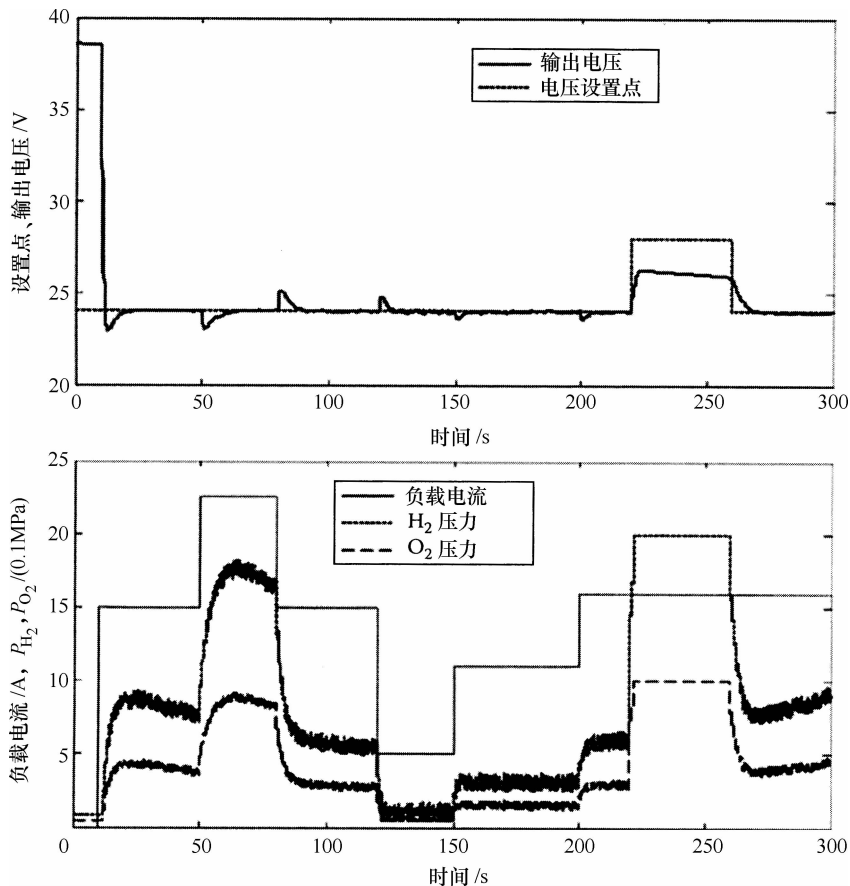


图 4-19 燃料电池神经网络最优控制：设置点、输出电压、氢气压力、氧气压力和负载电流
(出自 Anderson, C. A. et al. , *Design and control of fuel cells system for transport application*, Aalborg University, Project Report, 2002. 许可使用)

4.6 质子交换膜燃料电池非线性控制的模拟

对于式 (4-4) 推导的燃料电池反馈线性化的非线性控制，我们在 MATLAB / Simulink 的环境下进行模拟，测试了动态燃料电池模型和控制法^[9]。为简单起见，在模拟中，我们没有考虑燃料处理器、水和热管理，以及空气压缩机模型。我们使用文献 [10] 中的实验数据来验证了这个燃料电池动态模型的有效性。

图 4-20 是 Ballard 公司基于 MK5-E 的 PGS105B 燃料电池系统。我们用它来测试反馈线性化的非线性控制器。该系统一共有 35 个串联的电池，有效面积是 232cm²。它的膜电极包括石墨电极和 DowTM膜。反应气体（氢气和空气）是在电池内部加湿的；氢气在阳极侧再循环；空气流到阴极。通过压力调节器，阳极入口的氢气压力被调节到 0.3MPa。在空气出口的背压调节器使整个 Ballard 燃料电池堆保

持在 0.3MPa 的压力。通过可编程的负载，氧化剂流率自动调整到 4.5L/s；通过质量流率计，保证可以在阴极去掉足够的水。氢气补充和消耗的速度相同。在空气出口测量的电池堆温度保持在 72 ~ 75℃，这可以确保最大功率输出。

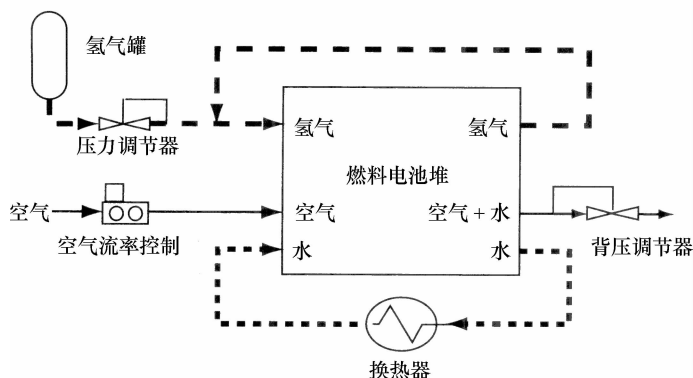


图 4-20 基于 PGS105B 系统的质子交换膜燃料电池堆（出自 Hamelin, J. et al., *Int. J. Hydrogen Energ.*, 26, 625, 2001. 许可使用）

图 4-21 是 Ballard 系统的简化图。这个 PGS105 系统更像是一个预设的控制系统，而不是一个反馈控制系统。如果超出设置范围，系统会自动关机，因此需要一个更高级别的控制系统。文献 [9] 中有非线性控制器实验装置的概述。为了在实际系统中实施这一控制方案，我们必须安装传感器来测量状态 P_{H_2} 、 $\dots$ 、 $P_{H_2O_c}$ 、电池堆电流和电压，根据用反馈线性化工具得到的非线性控制律，使用数字信号处理器（Digital Signal Processor, DSP）这样的主控制器。如图 4-21 所示，借助数字信号处理器，燃料电池可以与电子机架进行通信，也可以用电脑用户界面来监控。在实施一个控制方案以前，我们必须优先考虑燃料电池系统的安全问题。为了防止致命的事故和燃料电池系统的严重破坏，我们至少要先考虑燃料电池控制系统的几个问题：电池低电压，电池超载，高温，氢气泄漏，阳极与阴极的压力差。

为了控制整个燃料电池系统，系统中需要有传感器、温度和湿度控制执行器。在模拟中，由于系统中温度和湿度的响应时间非常缓慢，因此我们假设使用的加湿器和换热器是完美控制的。此外，在氢气排气口，需要有自动清除控制器。在空气和水排出口，必须有背压调节器与空气和氢气的入口流率协调，以确保氢气和空气压力保持在同一水平。如果假定电容是 $1F^{[12]}$ ，活化和浓度电阻的总和是 0.2 到 $0.3\Omega^{[13]}$ ，那么燃料电池堆的时间常数约为 0.2 ~ 0.3s。在阴极使用 10% ~ 90% 性能设置时间为 50ms 的快速执行器，在阳极使用 10% ~ 90% 性能设置时间少于 20ms 的快速执行器，才可能保持阳极和阴极侧的压力在同一水平。为了保证这一性能，

阳极压力控制器必须比阴极压力控制器快 3 倍，因为阳极压力是随阴极压力变化的^[13]。现在，在市场上就可以找到这样的快速执行器^[14]。然而实际上由于燃料电池模型参数和测量误差的不确定性，我们要达到预期的响应，可能会遇到严重障碍。此外，在燃料电池的非线性控制设计中，执行器、传感器、压缩机和数字信号处理器采样周期的时间延迟是不可避免的。虽然我们无法准确计算时间延迟，我们仍然可以在实际系统中使用铅补偿器来补偿。然而，由于铅补偿对噪声非常敏感，我们推荐使用一个多阶低通噪声滤波器^[13]。在文献 [12] 中的模拟，没有考虑时间延迟及测量不确定性和不准确性等问题。

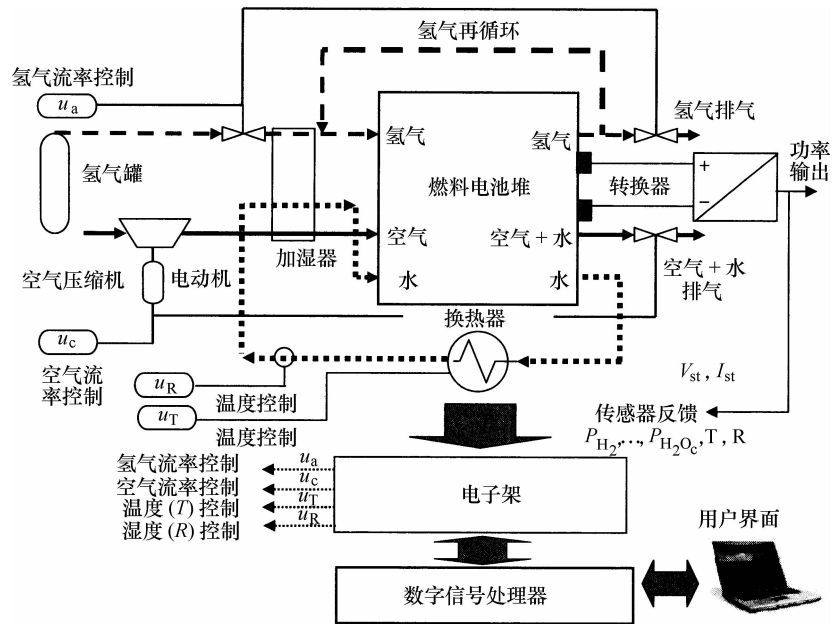


图 4-21 简化的燃料电池非线性控制实验设置（出自 Na, W. K. and Gou, B., *IEEE Trans. Energ. Convers.*, 23 (1), 179, 2008. 许可使用）

表 4-1 是模拟用参数的额定值。使用 Hamelin 等人的实验数据^[10]，我们可以验证所提出的燃料电池动态模型的有效性。在比较中，我们使用了电压和电流这两个最重要的变量。在文献 [10] 中，PGS105B 系统使用在 0 ~ 150A 之间快速变化的负载曲线。图 4-22 是相应的电池堆电流和电压瞬态值，其中实线代表实验数据^[10]。

图 4-23 是负载曲线的详细图。在模拟周期中，负载电阻从 0.145Ω 变化到 4.123Ω。图 4-22 显示，除了在时段（13s, 15s）和（25s, 29s）以外，实验数据与模拟结果非常吻合。在这两个时段中，电压差异的主要原因是燃料电池系统的内部电阻变化^[12]。电流的快速增加会使燃料电池内部电阻上的电压快速下降，这与温度变化对电阻的不利影响紧密相关。在这个模拟中，假设电池堆的温度保持在

353K。因为电流的快速变化，模拟结果与实验数据之间的微小差异是不可避免的。为了比较非线性控制器的效率，在燃料电池系统中我们使用了一个线性控制器。

表 4-1 模拟用的燃料电池参数

参数	参数值和定义	参数	参数值和定义
N	电池数:35	R	$2.45 \times 10^{-4} \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$
V_o	开路电池电压:1.032V	A_{fc}	电池有效面积:232cm ²
R	通用气体常数:8.314[J/(mol·K)]	V_a	阳极体积 0.005m ³ [15]
T	燃料电池温度:353K	V_c	阴极体积 0.01m ³ [15]
F	法拉第常数:96485C/mol	k_a	阳极转换系数: $7.034 \times 10^{-4} \text{ mol/s}$
α	电荷转移系数:0.5 ^[9]	k_c	阴极转换系数: $7.036 \times 10^{-4} \text{ mol/s}$
M	质量转移电压常数: $2.11 \times 10^{-5} \text{ V}$	P_{vs}	饱和压力:32kPa(在温度 353K 时)
N	质量转移电压常数: $8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{mA}$		

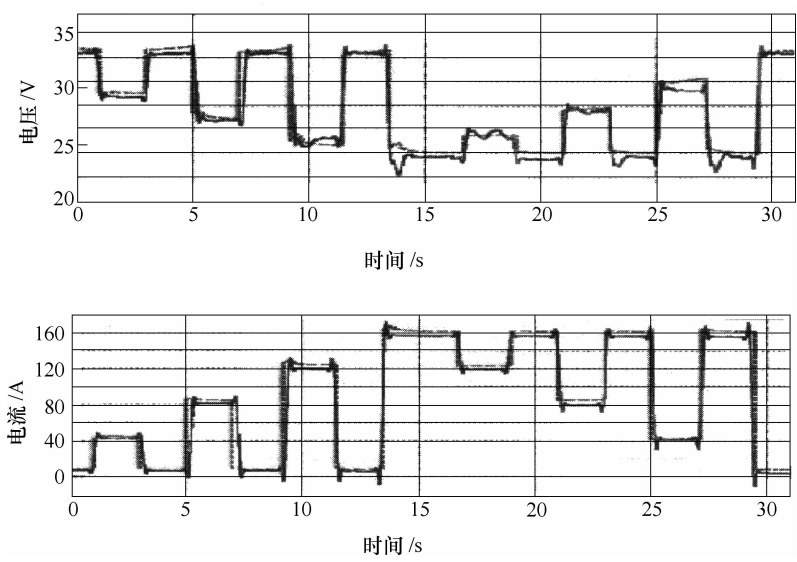


图 4-22 随负载变化的电压和电流
(实线是实验数据)

为了减少过冲，式 (4-10) 的反馈增益常数 k_{11} , k_{21} , k_{12} 和 k_{22} 要调整到 5 和 1，这是 k_{11} 和 k_{21} 在可行范围 $[0.1, 10]$ 内的最优值，也是 k_{12} 和 k_{22} 在可行范围 $[0, 10]$ 内的最优值。如果超出范围，很容易违反 MATLAB 的模拟极限。

对于图 4-22 ~ 图 4-24 的电压、电流和功率曲线，非线性控制和线性控制之间的差异并不明显。这是由于响应时间很快，少于几毫秒。然而，图 4-25 ~ 图 4-29 的其他模拟结果显示，使用非线性控制器的瞬态性能更好。这是因为线性控制器更

依赖工作点，而基于微分几何反馈线性化控制设计的非线性控制器不依赖于工作点^[16]。图4-26显示了氧气分压的过冲远大于氢气分压，这意味着氧气分压比氢气分压对负载变化更敏感。图4-27显示了氢气和氧气分压差的绝对值。在图4-27中，我们可以看到非线性控制器比线性控制器有更好的瞬态响应。一般来说，电池堆电流的增加必需消耗更多的燃料量，会导致反应物压力的减小。然而，气体流率与电池堆电流一同变化，补偿了增加的燃料消耗。

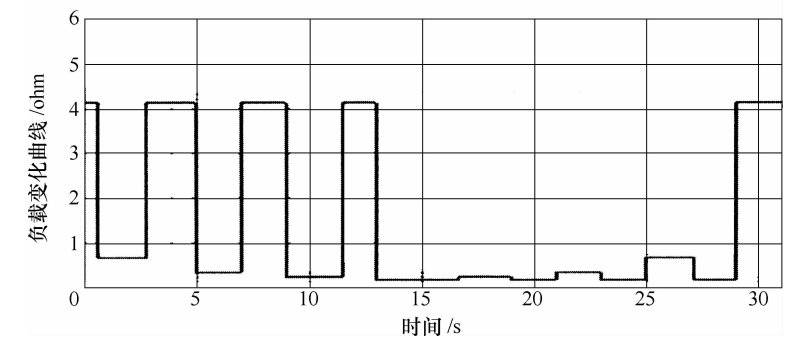


图 4-23 负载变化曲线

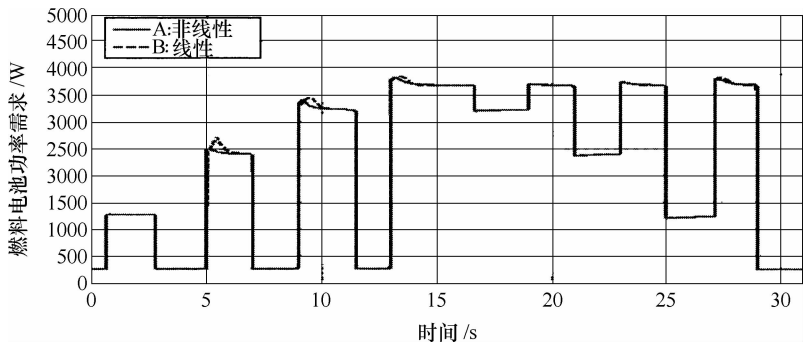


图 4-24 负载变化时的燃料电池功率需求

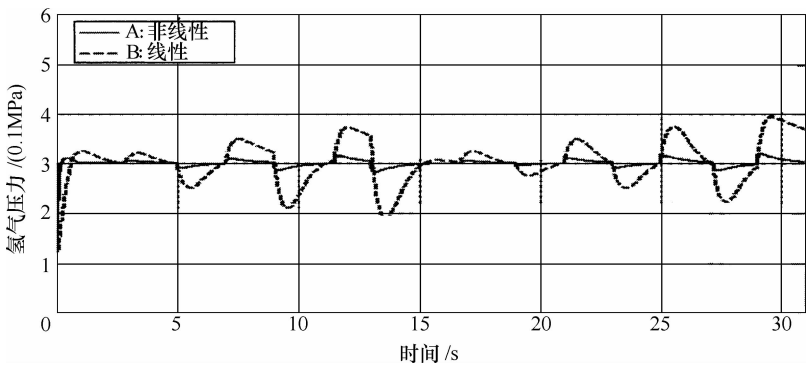


图 4-25 氢气压力的变化

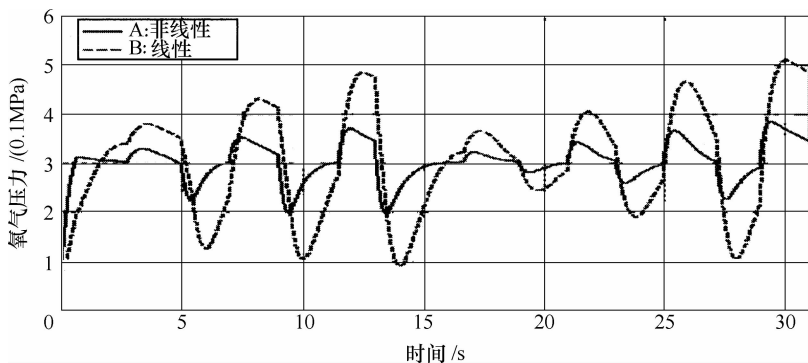


图 4-26 氧气压力的变化

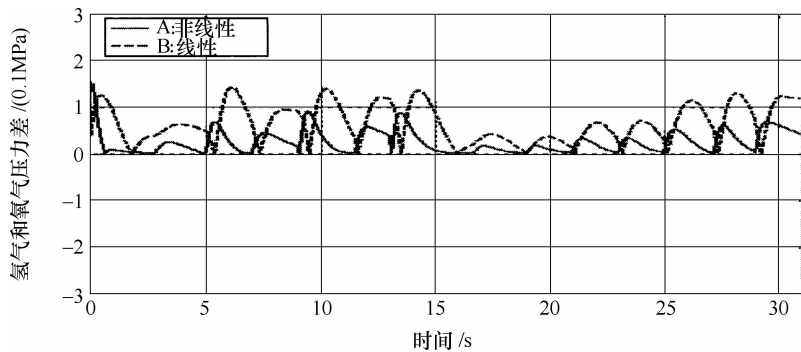


图 4-27 氢气和氧气压力差绝对值的变化

图 4-28 和 4-29 给出了氢气和氧气流率随负载变化的响应。氢气流率的变化范围是 $0 \sim 5\text{L/min}$ ，而氧气流率的变化范围是 $0 \sim 16\text{L/min}$ 。我们可以看到氧气流率的变化比氢气大很多。这是因为氧气流率比氢气流率对负载的变化更敏感。这也可以从两者压力的变化看到。

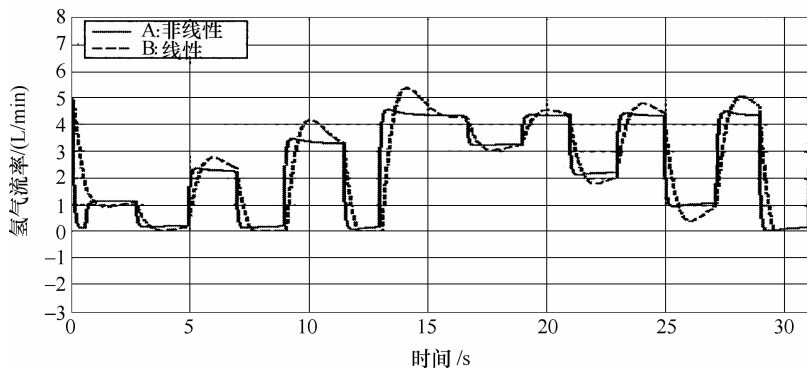


图 4-28 氢气流率的变化

在图 4-29 中，虽然非线性控制器比线性控制器对氧气流率略有些超调，但它显示了非线性控制器的响应时间快于线性控制器。从图 4-30 ~ 图 4-32 我们可以看到， $P_{\text{H}_2\text{O}_\text{A}}$ ， P_{N_2} 和 $P_{\text{H}_2\text{O}_\text{C}}$ 在负载变化时是稳定的。

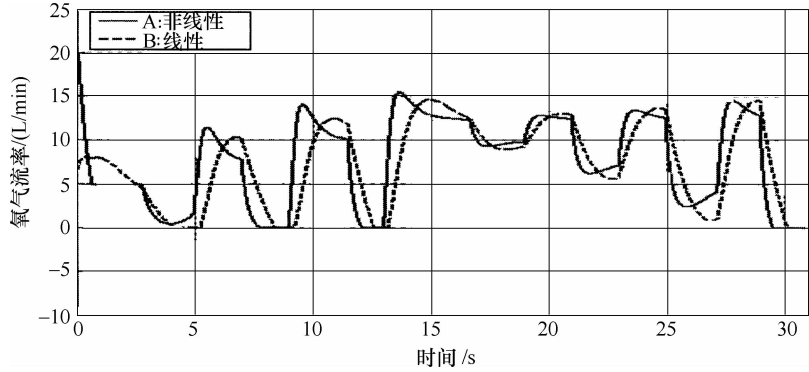


图 4-29 氧气流率的变化

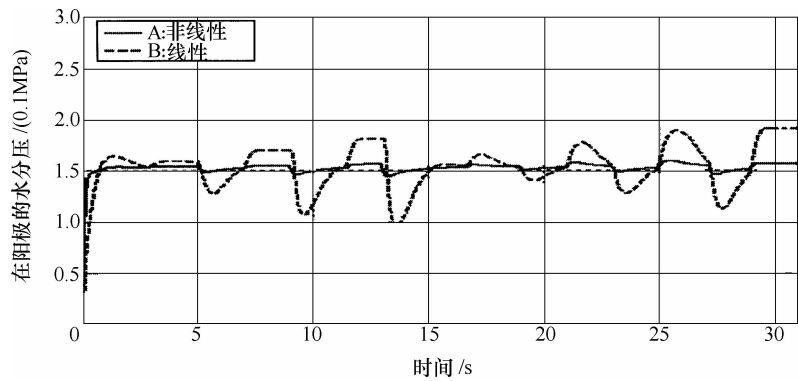


图 4-30 在阳极的水分压变化

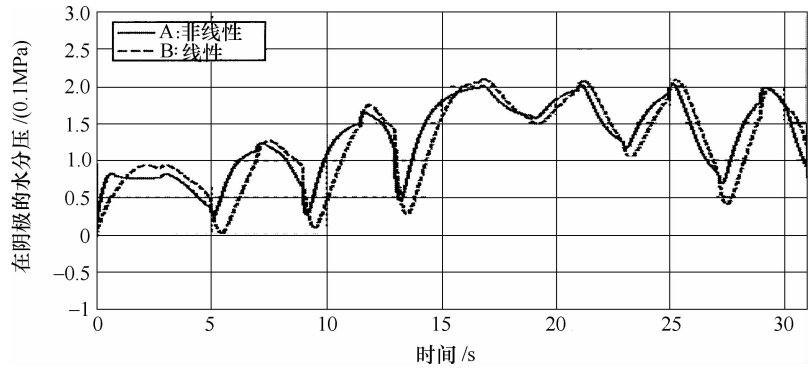


图 4-31 在阴极的水分压变化

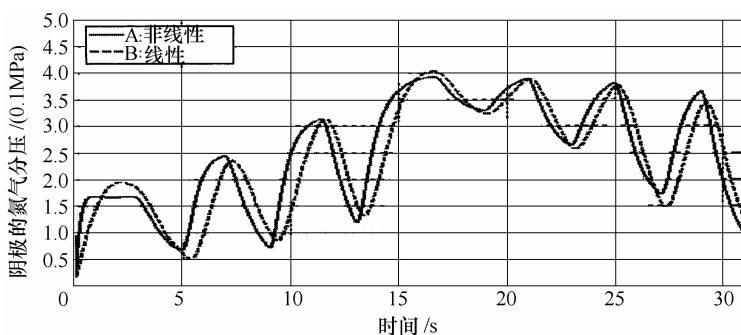


图 4-32 在阴极的氮气的分压变化

图 4-31、图 4-32 表明,在阴极的水分压和氮气的分压的控制变化上,非线性控制器和线性控制器的表现相似。此外,尽管在非线性和线性控制器的设计没有考虑到跟踪控制器,图 4-30 到 4-32 显示, $P_{\text{H}_2\text{O}_\text{A}}$, P_{N_2} , 和 $P_{\text{H}_2\text{O}_\text{C}}$ 还是在界定范围内 (0 ~ 40.4) 随负载变化的。这意味着在我们的设计中,非线性跟踪控制器的内部动态没有问题。我们还可以看到,在阳极侧的水分压比在阴极侧的水分压和氮气压力更稳定一些。此外,在阳极侧水分压与氢气的分压有类似的变化模式,这是因为氢气的摩尔分数很高,大约是 99%。因此,我们可以推论,负载变化对阴极侧的影响比对阳极侧的影响更大,这意味着我们需要在阴极侧使用一个比本章更先进的控制方案。

参 考 文 献

1. J.S. Yi and T.V. Nguyen, An along-the-channel model for proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Electrochemical Society*, 145(4), 1149–1159, 1998.
2. J. Golbert and D. Lewin, Model-based control of fuel cells: (1) Regulatory control, *Journal of Power Sources*, 135, 135–151, 2004.
3. R.N. Methekar, V. Prasad, and R.D. Gudi, Dynamic analysis and linear control strategies for proton exchange membrane fuel cell using a distributed parameter model, *Journal of Power Sources*, 165, 152–170, 2007.
4. W.C. Yang, B. Bates, N. Fletcher, and R. Pow, Control challenges and methodologies in fuel cell vehicle development, SAE paper 98C054, 1998.
5. J. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, and H. Peng, Control of fuel cell breathing, *IEEE Control Systems Magazine*, 24(2), 30–46, 2004.
6. A. Isidori, *Nonlinear Control Systems*, 3rd ed., London: Springer Verlag, 1995.
7. M.A. Henson and D.E. Seborg, Critique of exact linearization strategies for process control, *Journal of Process Control*, 1, 122–139, 1991.
8. J.J.E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.
9. W.K. Na and B. Gou, Feedback linearization based nonlinear control for PEM fuel cells, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(1), 179–190, 2008.

10. J. Hamelin, K. Abbossou, A. Laperriere, F. Laurencelle, and T.K. Bose, Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary application, *International Journal of Hydrogen Energy*, 26, 625–629, 2001.
11. K. Rajashekrara, Propulsion system strategies for fuel cell vehicles, SAE paper 2000-01-0369, 2000.
12. J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, New York: Wiley, 2002.
13. C.A. Anderson, M.O. Christensen, A.R. Korsgaard, M. Nielsen, and P. Pederson, Design and control of fuel cells system for transport application, Project Report, Aalborg University, 2002.
14. Burkert, <http://www.bci.buerkert.com/product>.
15. M.J. Khan and M.T. Labal, Dynamic modeling and simulation of a fuel cell generator, *Fuel Cells*, 1, 97–104, 2005.
16. B.W. Bequette, Nonlinear control of chemical process: A review, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 30, 1391–1413, 1991.

第 5 章 在 Simulink 中实现燃料电池模型和控制器

5.1 简介

我们利用 MATLAB®/Simulink® 已经开发了动态燃料电池模型和控制器。Simulink 是 MathWorks 公司 MATLAB 程序的一个扩展工具箱，是一个强有力的模拟和数学表达工具。我们可以在 Simulink 环境中选择适当的积分方法，并建立运行时间和初始条件。在 Simulink 中，可以用框图把系统画在屏幕上。框图有以下的元素可以使用：传递函数、求和点，以及虚拟的输入和输出设备函数发生器和示波器等。因为 Simulink 提供了图形用户界面，所以很容易建立框图，进行模拟并分析结果。在 Simulink 中，模型是分层的，因此可以在高层次来查看系统，也可以用鼠标双击每个模块来查看详情。

5.2 在 Simulink 中实现燃料电池模型

为了在 Simulink 中创建一个燃料电池的模型，我们做以下假设：

- 由于电池堆温度的响应时间很慢（约 $102\text{s}^{[1]}$ ），假设电池堆的工作温度是恒定的。
- 在燃料电池阳极和阴极两侧都被很好地加湿。
- 对水的管理，假设液态水不离开电池堆，如果阴极或阳极任何一侧气体湿度降至低于 100%，液态水会蒸发补充^[2]。
- 假设加湿器和温度控制器工作完美^[3]。
- 为了建立燃料电池的简化动态模型（图 5-1），假设入口反应物的摩尔分数为常数。换句话说，纯氢气（99.99%）被直接输入阳极，空气（按着氮和氧 21:79 的比例均匀混合）被送入阴极^[3]。
- 假设所有气体都是理想气体，可以使用理想气体定律和摩尔守恒定律。

因此，在这个模拟中，水管理和温度控制不是问题。燃料电池系统包括四个部分：阳极模型、阴极模型、燃料电池电压模型和控制模块。

首先考虑燃料电池电压模块。燃料电池堆输出电压 V_{st} 被定义为以下参数的函数：电池堆电流、反应物分压、燃料电池温度和膜湿度。

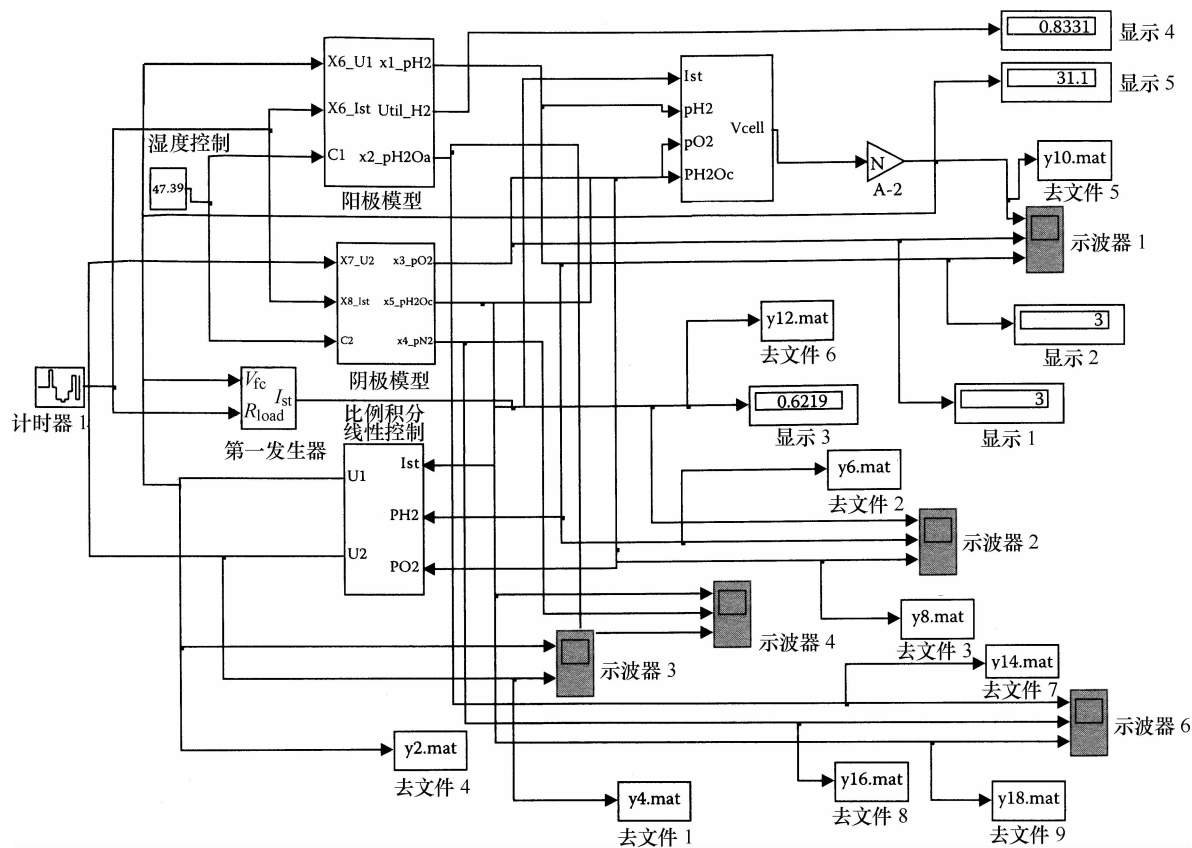


图 5-1 质子交换膜燃料电池的系统框图

$$V_{st} = E - V_{activation} - V_{ohmic} - V_{concentration} \tag{5-1}$$

式中

$$E = N_o [V_o + (RT/2F) \ln (P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}} / P_{H_2O_c})]$$
——电池的热力学势能或 Nernst 方程中的可逆变电压[式 (5-1)]；

$V_{activation}$ ——电极表面反应速率导致的电压损失；

V_{ohmic} ——电解质中质子流电阻导致的电压损失；

$V_{concentration}$ ——因浓度降低或氧气和氢气质量输送导致的电压损失。

它们的值给出如下：

$$V_{activation} = N \cdot \frac{RT}{2\alpha F} \cdot \ln \left(\frac{I_{fc} + I_n}{I_o} \right) \tag{5-2}$$

$$V_{ohm} = N \cdot I_{fc} \cdot r \tag{5-3}$$

$$V_{concentration} = N \cdot m \exp(n \cdot I_{fc}) \tag{5-4}$$

在式 (5-1) 的 E 中， P_{H_2} ， P_{O_2} 和 $P_{H_2O_c}$ 分别是氢气、氧气和水的分压；下标“c”代表从阴极侧排出的水的分压。

在文献 [2] 中，详细解释了每个电压损失。在文献 [1, 3] 中介绍了其他电压，其中的燃料电池电压主要表达为一些参数的物理和经验关系的组合，这些参数包括膜含水量、湿度、温度及反应物浓度（表 5-1）。在本书中，我们将使用式 (5-1) 给出的普遍电压公式。因为水和温度的响应时间很慢，我们假定它们是恒定的。图 5-2 是根据式 (5-1) 设定的燃料电池电压模块。

表 5-1 电池电压参数

参 数	参数值和定义	参 数	参数值和定义
N	电池数	I_{fc}	输出电流密度 (A/cm ²)
V_o	开路电池电压 (V)	I_o	交换电流密度 (A/cm ²)
R	通用气体常数 [J/(g · mol · K)]	I_n	内部电流密度 (A/cm ²)
T	燃料电池温度 (K)	m and n	质量转移电压常数
F	法拉第常数 (C/mol)	r	面积比电阻 (kΩ · cm ²)
α	电荷转移系数		

出自：Khan, M. J. and Labal, M. T. , *Fuel Cells*, 4, 463, 2005. 许可使用。

阳极和阴极侧的反应物流率是由分压和电池堆电流决定的。如图 5-3 所示，使用理想气体定律，我们可以模拟每个分压模块。从图 5-3 中可以看到，阳极模块包括氢气模型和水模型。每个压力的输出，甚至是控制器的输出，都有限制器，这是为了防止代数循环或极端数值造成问题^[1]。图 5-4 和图 5-5 分别是详细的氢气模型和水模型。

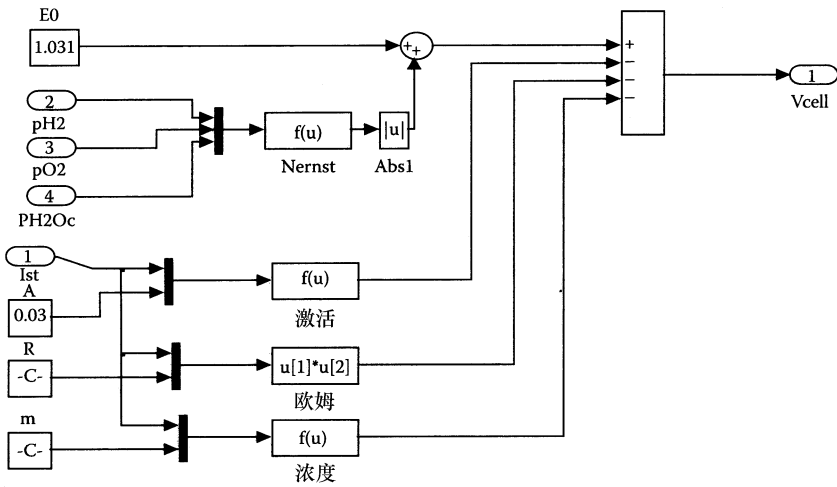


图 5-2 燃料电池电压模块

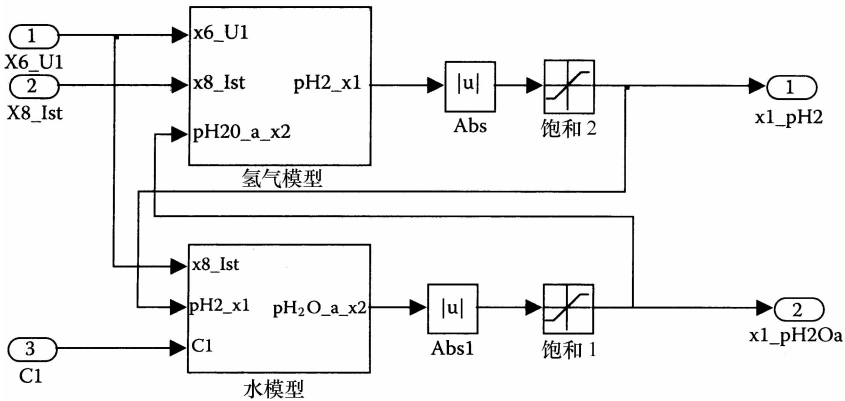


图 5-3 阳极模块

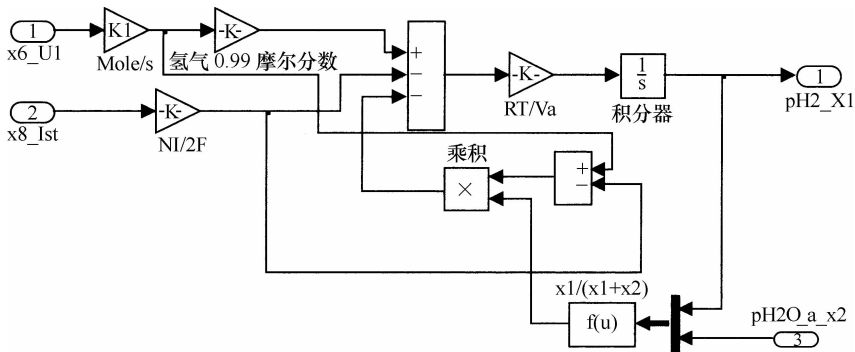


图 5-4 氢气模型

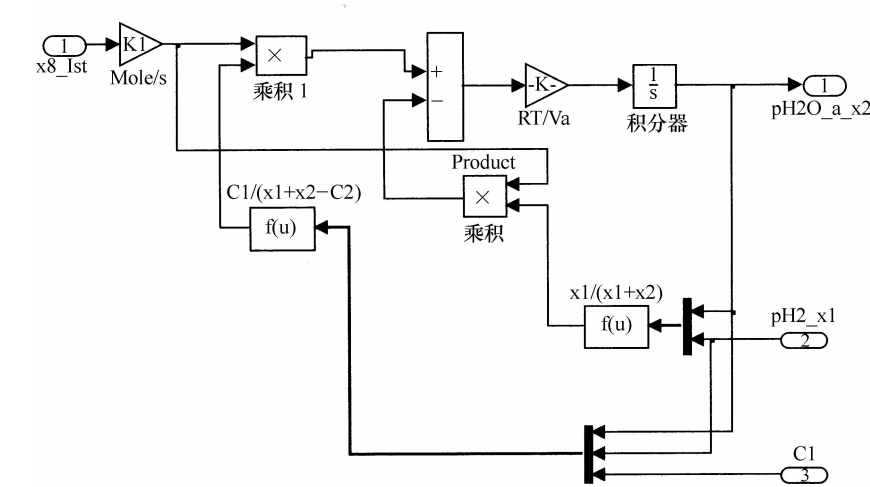


图 5-5 阳极侧水的模型

阴极模型包括图 5-6 ~ 图 5-9 所示的氧气，水和氮气模型。

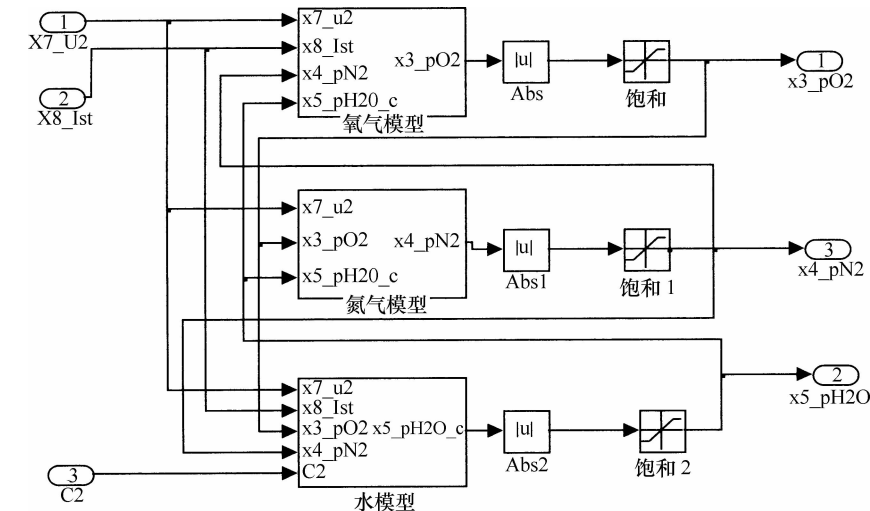


图 5-6 阴极模型

在阳极模块中，假设氢气的摩尔分数是 99%，我们用一个转换因子把氢气入口流率从 L/min 转换成 mol/s（每分钟一标准升为 7.034×10^{-4} mol/s）。在阴极模块中，空气是按氮气和氧气 21:79 的比例均匀混合的，转换因子是 7.034×10^{-4} mol/s^[1]。为了在很短的时间内分析数据，我们使用了一个快速常微分方程求解程序 Ode45，该程序基于 Dormant-Prince 算法，是直接的一步 Runge-Kutta 数值法。我们推荐拿它作为第一个尝试的方法^[4]。尽管它的设置时间是 100s，但是可以在 10s

电池堆电流是由电池电压 V_{fc} 和负载模块 R_{load} 生成的。负载模块是由计时器制成的，它的时间矩阵是 $[0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0, 40.0, 45.0, 50, 55s]$ ，对应于振幅电阻矩阵 $[1, 0.6, 0.3, 0.175, 0.3, 1, 2.5, 5, 1, 5\Omega]$ 。

5.3 在 Simulink 中实现燃料电池控制器

为了控制燃料电池系统的压力，需要传感测量氢气和氧气的压力，并且与图 5-10 中线性比例积分控制器的三个大气压参考压力相比较。在前馈控制的情况下，电池堆电流会反馈到控制器。但在这个模拟中，我们没有使用前馈控制（图 5-11）。

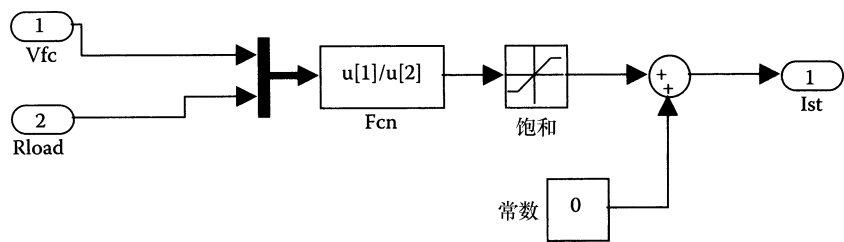


图 5-10 负载和电流模块

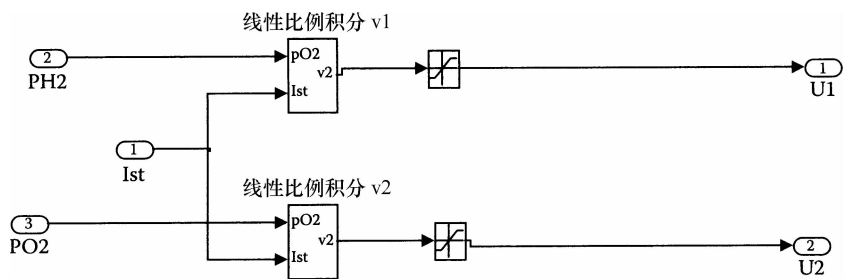


图 5-11 线性控制器模块

图 5-12 所示是一个控制压力的比例积分控制器模块。通过试验误差法，可以得到最佳比例积分增益值为 5。

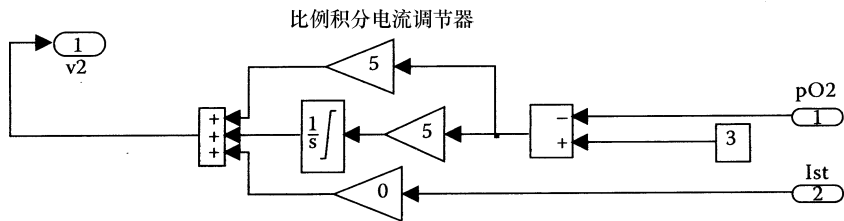


图 5-12 线性比例积分控制器模块

如图 5-13 所示，为了设计非线性压力控制器，我们使用了反馈线性化算法。非线性控制律是用 4.4 节中的解耦矩阵推导的。

在图 5-13 中，非线性控制率向量 U 是通过反馈线性化得到的，在这个模块中也使用线性控制器模块来产生一个控制输入 V 向量。

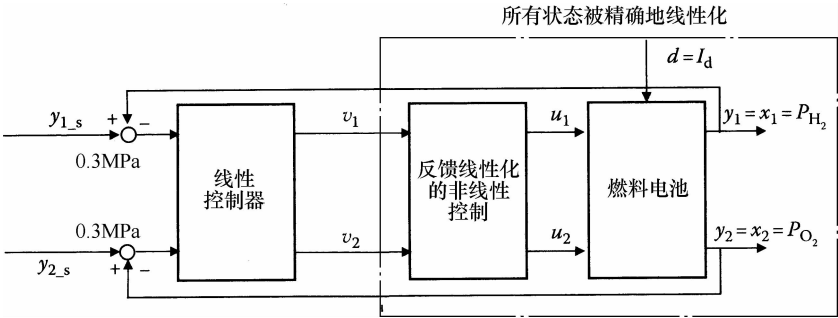


图 5-13 质子交换膜燃料电池的非线性控制模块

为了实现非线性控制律，我们使用了 Simulink 中的多路转换器和其他数学函数。在产生非线性控制律之前，我们用一个滤波器来除去阳极和阴极流率中的突变（图 5-14）。

5.4 模拟结果

为了模拟，我们用 Simulink 中的一个计时器来产生负载曲线。负载曲线的详细情况如图 5-15 所示。

燃料电池电压控制如图 5-16 所示。燃料电池电压随着负载曲线的变化而变化。因为燃料电池系统不能补偿快速的功率需求（例如加速和减速，或燃料电池汽车其他快速负载变化）所以我们需要使用辅助电源（例如电池或超级电容）。

根据负载变化，电流从 6.5A 变到 160A。燃料电池系统可以产生最高 4.6kW 的功率。

对于电压（图 5-16）、电流（图 5-17）和功率（图 5-18），非线性控制和线性控制的区别不是很明显。这是因为响应时间很快，据文献 [5] 报道，小于几个毫秒。

在图 5-19 和图 5-20 中，氢气流率在 0 ~ 5L/min 之间变化，氧气流率在 0 ~ 14L/min 之间变化。我们可以看到，氧气流率比氢气流率变化大得多。这是因为氧气流率比氢气流率对负载变化更敏感。

根据图 5-21 和图 5-22，燃料电池系统的非线性和线性压力控制器都跟随三个大气压参考值变化。在本书所附的光碟中，可以找到这些模拟文件。通过改变负载曲线，可以得到不同的结果。

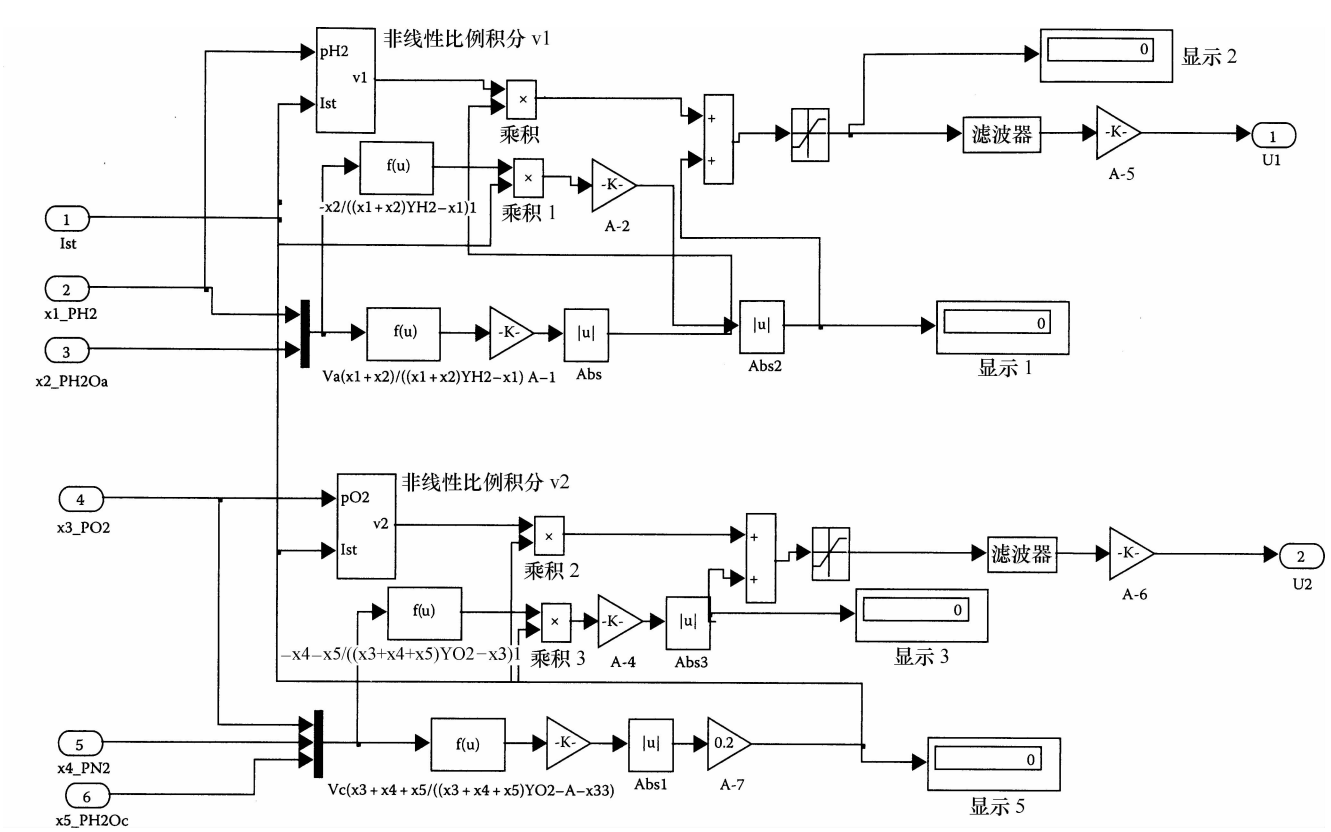


图 5-14 使用反馈线性化的非线性控制器模块

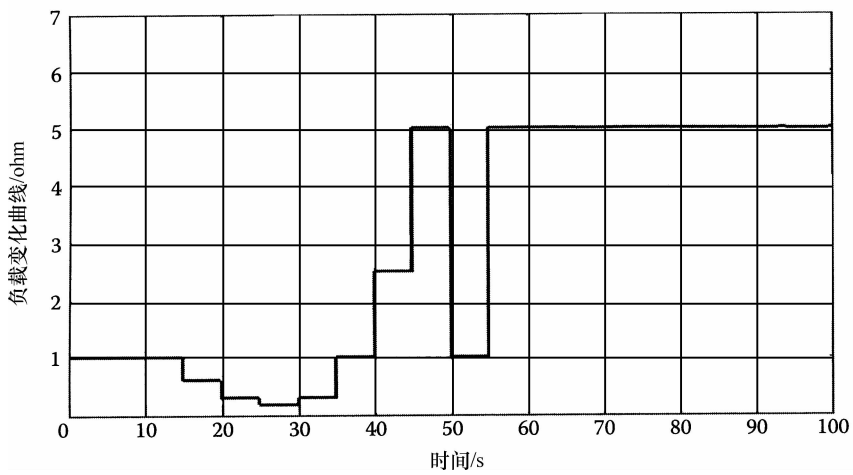


图 5-15 负载变化曲线

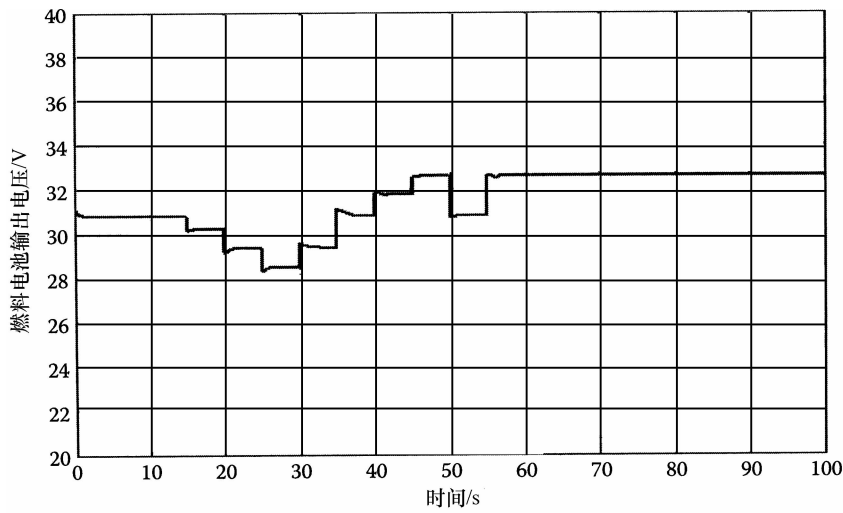


图 5-16 负载变化时的燃料电池电压

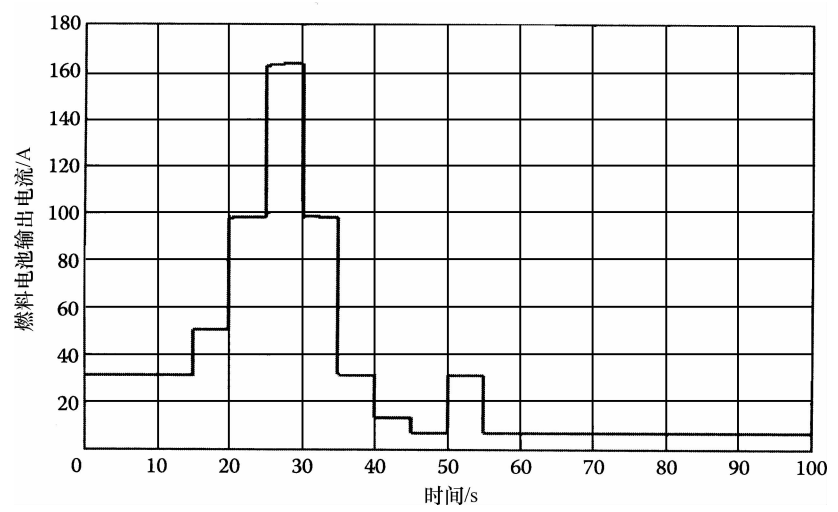


图 5-17 负载变化时的燃料电池电流

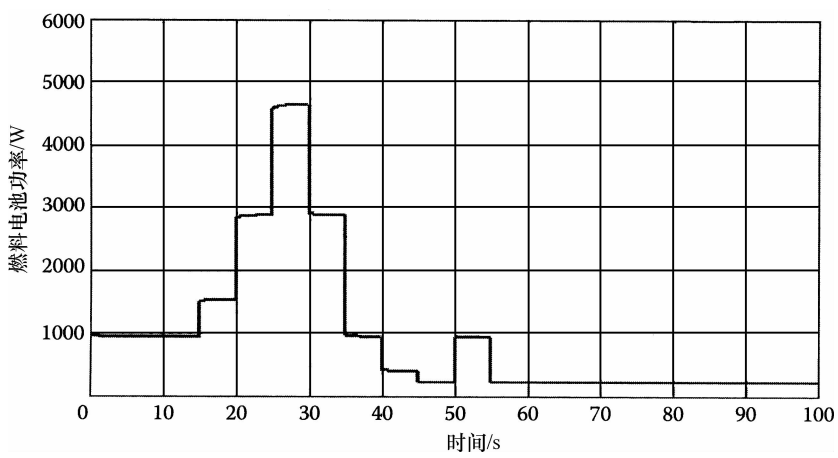


图 5-18 负载变化时的燃料电池功率

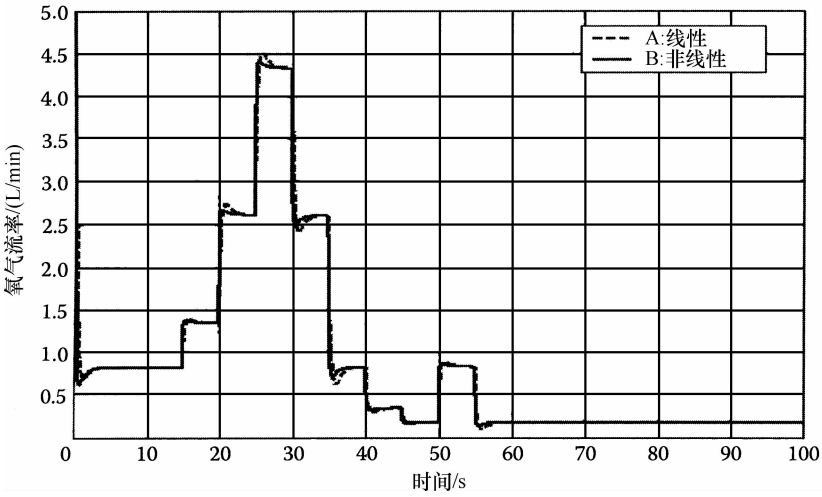


图 5-19 氢气流率的变化

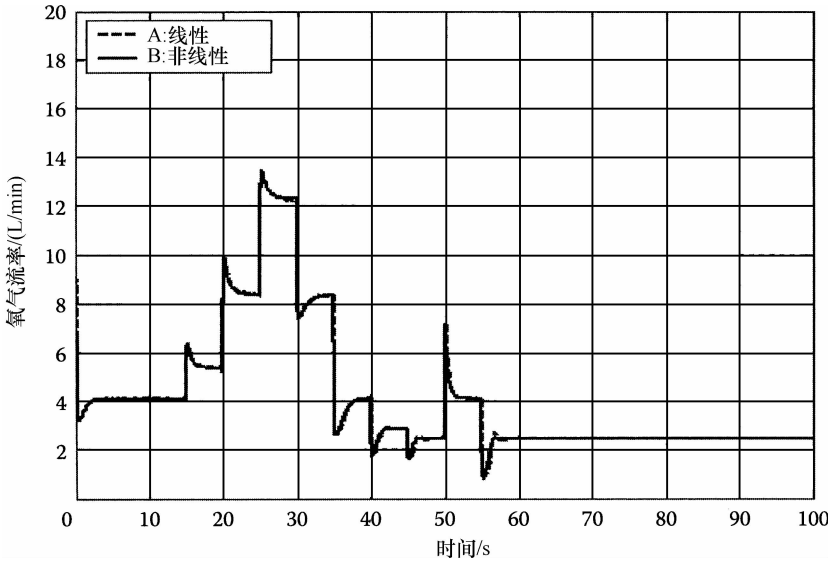


图 5-20 氧气流率的变化

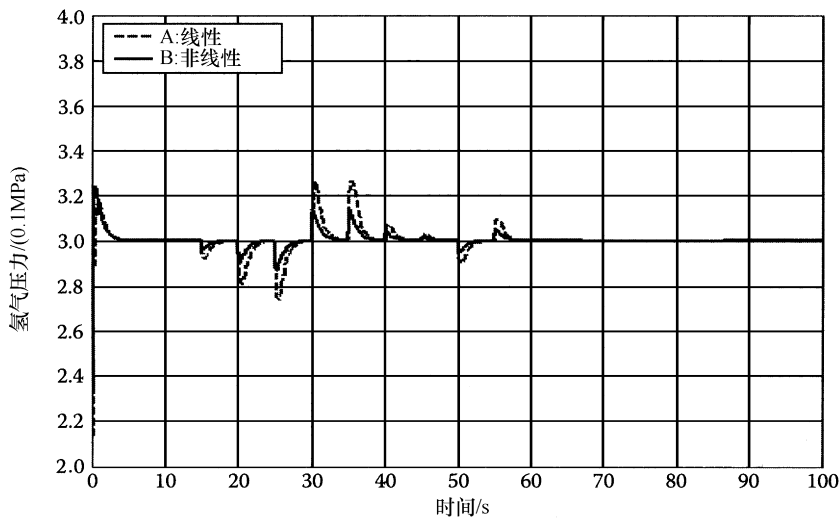


图 5-21 氢气压力的变化

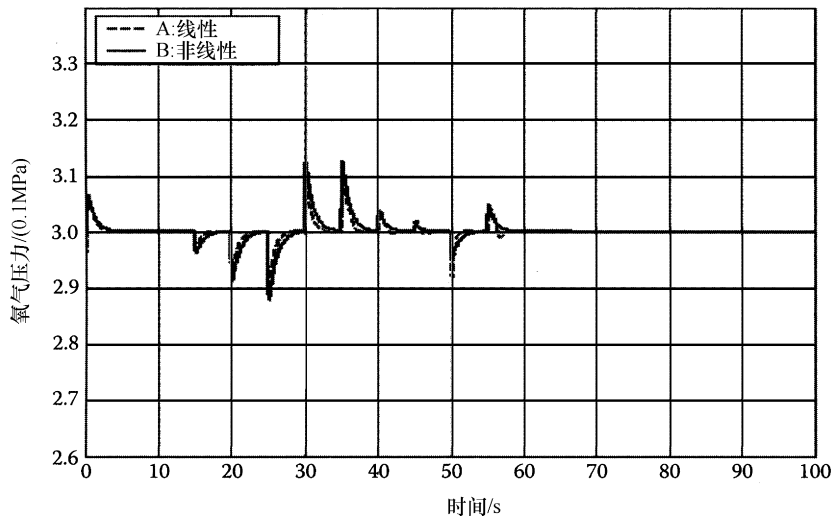


图 5-22 氧气压力的变化

在本节中，我们用 MATLAB/Simulink 建立了一个 5kW 质子交换膜燃料电池的动态模型，分析讨论了它的线性与非线性控制器及模拟结果。从图 5-16 中可以看到，燃料电池系统应与辅助电源系统协调工作，以避免负载变化引起的电压降。为了能把燃料电池系统与辅助电源系统整合到一起，需要使用电力电子设备和电器元件，如电容、电阻和电抗器等。因为开关装置会使模拟变慢，而我们又使用了

1kHz 以上的高开关频率，所以很容易得到转换误差。举例说，为了模拟一个 30s 的时间段，我们需要 5 ~ 6h 的时间才能完成模拟。本书并不涉及混合动力燃料电池系统的模拟。

参 考 文 献

1. M.J. Khan and M.T. Labal, Modeling and analysis of electro chemical, thermal, and reactant flow dynamics for a PEM fuel cell system, *Fuel Cells*, 4, 463–475, 2005.
2. J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, New York: Wiley, 2002.
3. J. Purkrushpan and H. Peng, *Control of Fuel Cell Power Systems: Principle, Modeling, Analysis and Feedback Design*, Germany: Springer, 2004.
4. C.-M. Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink*, New Jersey: Prentice Hall, 1998.
5. C.A. Anderson, M.O. Christensen, A.R. Korsgaard, M. Nielsen, and P. Pederson, Design and control of fuel cells system for transport application, Project Report, Aalborg University, 2002.

第 6 章 燃料电池在汽车中的应用

6.1 简介

我们大量依赖的化石燃料包括煤、石油和天然气，会引起空气污染和温室气体效应问题。最近的研究^[1]显示，约 18% 的温室气体二氧化碳，是由汽车排放的。因此，燃料电池汽车的开发对于我们的环境，甚至对于我们的经济都是非常重要的；特别是目前石油价格飞涨。燃料电池系统被广泛认为是最有前途的能源之一。这要感谢它的高能源效率、非常低的氮氧化物和硫氧化物排放、低噪声及其清洁的能源产生过程。此外，燃料电池系统能使用其他常规和替代燃料，如氢、乙醇、甲醇和天然气。根据现在使用的电解质种类，燃料电池分为质子交换/聚合物电解质膜燃料电池（Proton Exchange/Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, PEMFCs）、固体氧化物燃料电池（Solid Oxide Fuel Cells, SOFC）、磷酸燃料电池（Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFCs）、熔融碳酸盐燃料电池（Molten Carbonate Fuel Cells, MCFCs）、碱性燃料电池（Alkaline Fuel Cells, AFCs）、直接甲醇燃料电池（Direct Methanol Fuel Cells, DMFCs）、锌空气燃料电池（Zinc Air Fuel Cells, ZAFCS）和光子陶瓷燃料电池（Photonic Ceramic Fuel Cells, PCFCs）^[1]。

到目前为止，质子交换膜燃料电池（PEMFCs）被认为是燃料电池汽车、小型和中等规模分布式发电机最有希望的候选能源。因为它们具有高功率密度、固体电解质、长电池堆寿命和低腐蚀。质子交换膜燃料电池可以在低温下（50 ~ 100°C）工作，也可以快速启动，因此这种电池对交通运输应用格外有吸引力，因为交通工具需要快速启动和在短时间里的快速动态响应（停止、运动、加速和减速）。

燃料电池比内燃机（Internal Combustion Engine, ICE）效率更高。根据文献[2]，直接利用天然气中氢气的燃料电池汽车的效率比内燃机汽车的效率高两倍以上。然而，为了使燃料电池汽车商业化，还要考虑其性能、可靠性、耐久性、成本、燃料可获得性和价格，以及公众的接受程度^[3]。特别是以下几方面都是至关重要的：燃料电池系统在瞬变中的性能、燃料电池的成本、氢气的可获得性和燃料电池汽车商业化的成功。本章 6.2 节将讨论燃料电池汽车的部件。6.3 和 6.4 节将分别讨论混合燃料电池系统的设计和电动汽车的控制。6.5 节将讨论混合燃料电池系统的故障诊断。

6.2 燃料电池汽车的部件

燃料电池汽车 (Fuel cell vehicle, FCV) 用氢燃料发电的燃料电池系统来驱动牵引电动机。这种汽车系统有三个重要组成部分。首先是燃料电池和燃料电池子系统, 第二是氢燃料储存或燃料处理器, 第三是电力驱动系统。

6.2.1 燃料电池和燃料电池子系统

因为在第2章中已经介绍了燃料电池的工作原理, 本节将主要集中介绍燃料电池的子系统——气体流动管理、水管理和热管理系统。

6.2.1.1 气体流动管理子系统

根据负载电流消耗, 需要以适当的速率把氢气和氧气供给燃料电池。因为阴极反应比阳极反应慢很多, 所以供给阴极的氧气往往有较高的化学计量流率。由于燃料电池的电压在很大程度上依赖于高化学计量的空气流率, 压缩机的作用就变得非常重要, 因为它可以吹进更多的空气。另一个问题是阳极和阴极两侧之间压力的控制, 这是为了防止膜破裂。阴极侧执行器性能 10% ~ 90% 的设置时间是 50ms, 阳极侧执行器性能 10% ~ 90% 的设置时间小于 20ms。依靠这两个快速执行器, 才可能把阳极和阴极的压力维持在一定的水平。为了保证这一性能, 阳极压力控制器必须比阴极压力控制器快 3 倍, 因为阳极侧压力随着阴极侧压力变化^[4]。一个按最佳速度工作的空气压缩机可以根据不同的电力需求提供变化的空气量。由于电动机驱动压缩机产生附加功率损耗, 压缩机必须与燃料电池功率管理系统协调, 才能减少功率损耗。对于直接使用氢气的燃料电池系统, 为了保证燃料电池堆的正常运行, 需要控制氢气被加湿器加到 100% 的相对湿度, 然后再进入阳极侧。氢气需要回流, 以提高利用率。为了避免气体和杂质的积累, 还必须有一个氢气清除阀。

6.2.1.2 水管理子系统

为了使质子交换膜燃料电池系统达到高效率, 水管理是至关重要的。水管理系统有三个主要功能:

- 1) 为膜适当充水。
- 2) 去除电池堆中产生的水。
- 3) 冷却电池堆以控制工作温度。

首先, 膜的适当充水与膜的导电率有关, 这在很大程度上会影响电池堆在高功率密度下工作的性能; 其次, 适当去除每个电池中产生的水可以保证气体通道不被聚集起来的水堵住, 这可以避免电池性能下降。冷却系统与温度控制系统紧密相关, 我们将在下面的章节中考虑。

6.2.1.3 热管理子系统

热管理是对燃料电池机理影响最大的因素。它能确保电池堆温度维持在一个期望的水平, 进而直接影响燃料电池的性能^[1,5,6]。

图 6-1 显示, 极性曲线会随温度升高而向上移动。现在已经研发了一系列以控制为目的的燃料电池模型^[4—21], 它们都假定温度是恒定的。尽管温度控制对燃料电池的工作是至关重要的, 文献 [4—21] 中提出的模型因为考虑到温度太复杂, 并没有把温度当做一个状态变量。在文献 [22] 中, 温度被定义成一个状态变量, 根据瞬态燃料电池的热模型提出了控制方案。

在文献 [11, 12, 15] 中报道了几个质子交换膜燃料电池的热模型。然而, 这些模型的提出并不是为了控制设计, 而是为了数学分析和实验数据验证。根据文献 [11, 12, 15] 中瞬态的热模型, 我们在这节中将提出一个以控制为目的的动态热模型。

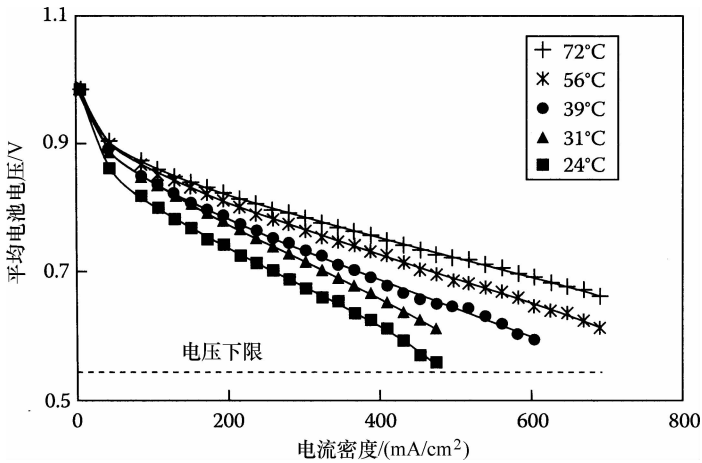


图 6-1 不同温度下的极性曲线

(出自: Larminie, J. and Dicks, A., *Fuel Cell Systems Explained*, Wiley, New York, 2002. 许可使用)

瞬态能量平衡可以由下式描述

$$\dot{Q}_{\text{stack}} = C_t \frac{dT_s}{dt} = P_{\text{tot}} - P_{\text{elec}} - \dot{Q}_{\text{cool}} - \dot{Q}_{\text{loss}} \quad (6-1)$$

式中 $\dot{Q}_{\text{stack}}$ ——电池堆吸收热量的速率 (J/s);

C_t ——热容量 (J/C);

P_{tot} ——化学反应中释放的总功率 (W);

P_{elec} ——负载消耗的功率 (W);

$\dot{Q}_{\text{cool}}$ ——冷却系统 (换热器) 的热流率;

$\dot{Q}_{\text{loss}}$ ——通过电池堆表面的热流率。

使用氢气的消耗速率可以计算总功率:

$$P_{\text{tot}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{-used}} \Delta H = \frac{NI_{\text{fc}}}{2F} \Delta H \quad (6-2)$$

式中 ΔH ——氢气的焓变化 (285.5 kJ mol/s) ;

$\dot{m}_{\text{H}_2\text{-used}}$ ——氢气消耗速率。

输出电功率给出如下:

$$P_{\text{elec}} = V_{\text{st}} I_{\text{fc}} \quad (6-3)$$

冷却水散热的速率与换热器的水流率直接相关。关系给出如下^[4]:

$$\dot{Q}_{\text{cool}} = \dot{m}_{\text{cool\_water}} \cdot C_p \cdot \Delta T_s \quad (6-4)$$

式中 $\dot{m}_{\text{cool\_water}}$ ——水泵的流率 (L/min) ;

C_p ——水的比热系数 (4182 J/kg · K) ;

ΔT_s ——允许的温度升高范围 (10K)。

水泵流率可以由时间延迟和转换因子来描述:

$$\dot{m}_{\text{cool\_water}} = \frac{\kappa_c}{(1 + \tau_c s)} u_{\text{cl}} \quad (6-5)$$

式中, τ_c 是时间延迟常数, 值为 70s; κ_c 是转化因子, 值为 1.5, 这意味着, 如果换热器的控制输入 u_{cl} 取值是 0 ~ 10V, 那么 $\dot{m}_{\text{cool\_water}}$ 取值范围是 0 ~ 15L/min, 并且有 70s 的时间延迟。

电池堆表面的热损耗可以用下式计算:

$$\dot{Q}_{\text{loss}} = hA_{\text{stack}} \cdot (T_s - T_{\text{amb}}) = \frac{T_s - T_{\text{amb}}}{R_t} \quad (6-6)$$

式中 hA_{stack} ——电池堆导热系数, 值为 17W/K^[11,12,15] ;

T_{amb} ——周围环境温度, 约等于 25°C (298.15K) $\pm 5\%$;

R_t ——电池堆的热阻抗, 它是 hA_{stack} 的倒数, 等于 0.0588K/W。

燃料电池的热时间常数为

$$\tau = R_t C_t = \frac{MC}{hA_{\text{stack}}} \quad (6-7)$$

式中 MC 是以下值的乘积: 电池堆质量, 平均比热容值 35kJ/K, 热容量 C_t 值 35kJ/K, 和 τ 值 2059s^[10]。

式 (6-7) 显示我们可以类比电路建立热等效环路模型^[17]:

$$C \frac{dv}{dt} = i \quad (6-8)$$

式中, 电池堆温度对应于电压, 能量流动 (P_{tot} , P_{elec} , $\dot{Q}_{\text{cool}}$ 和 $\dot{Q}_{\text{loss}}$) 对应于电流, 热容量 C_t 对应于电容。

图 6-2 中, 负载变化导致燃料电池堆温度变化, 燃料电池电压和电流被当做外

来输入或干扰，电池堆温度被当做输出来设计控制器。总功率 P_{tot} 取决于氢气消耗；氢气消耗取决于负载变化和电功率；而 P_{elec} 取决于负载电流。冷却功率 $\dot{Q}_{\text{cool}}$ 和电池堆表面的热损耗 $\dot{Q}_{\text{loss}}$ 是电池堆温度变化的函数。因此，图 6-2 中的热等效环路需要考虑四个能量流动源。

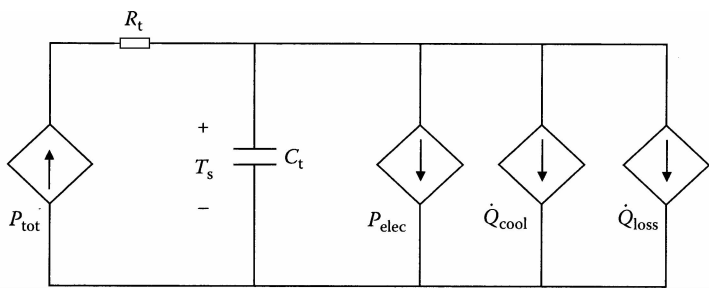


图 6-2 燃料电池的热等效环路

6.2.2 氢气储存和燃料处理器

质子交换膜燃料电池需要氢气供给，而氢气又是地球上最富饶的资源。氢气无色无味，是一种理想的能源。与汽油相比，同等质量的氢气有非常高的能量密度。这意味着氢气一般能比汽油产生多得多的能量。对于直接使用氢气的燃料电池系统，需要在车中安装压缩氢气罐，或冷却液态氢罐，或金属氢化物能量储存装置。

最常见的氢气储存方法是把它用高压压缩到一个圆柱罐里来增加它的密度。压缩储存的主要问题是需要很大的体积，而且钢合金做的容器通常很重。也可以使用铝材做圆柱罐，但铝材易损坏而且很贵。通常，储存的压力在 200 ~ 450bar (20 ~ 45MPa) 之间 (3 000 ~ 6 000lb/in²)^[6]。在实际应用中，氢气储存密度是 3% ~ 4%。这些储存罐的体积为 30 ~ 300 L^[6]。

在 20K 温度和 0.5MPa 气压之下，可以得到液态氢。如果需要大量的氢，可以使用低温液态氢存储。宝马汽车公司 (Bavarian Motor Works, BMW) 已经演示了在汽车中的低温技术可以达到 14.2% 的储存效率。这种技术主要涉及是在低温保存氢，并防止氢蒸发。

金属氢化物它把金属原子和氢键和到一起，是另外一种储存氢的方法。为了从金属氢化物中释放出氢气，需要加热到 100℃ 以上，因此，对于低温工作的质子交换膜燃料电池应用不是好的选择。尽管金属氢化物在单位体积内能吸收大量的氢，但是合金太贵，而且氢的密度太低，金属氢化物太重，而且对气体中的杂质很敏感。

我们也可以使用天然气、汽油和甲烷这类的碳氢化合物，借助以下化学反应过

程产生氢气：气化、半氧化和自动热转化^[6]。这些化学过程需要一个燃料处理器。但在汽车中使用燃料处理器会引发另一个问题，就是慢动态，这是因为热传输和质量传输过程很慢，混合也有延迟^[23]。为了补偿慢动态，需要一个电池或超级电容储存能量帮助汽车启动、加速和减速。

图 6-3 是基于 Ballard MK5-E 的 PGS105B 系统，这是直接使用氢气罐的燃料电池系统，我们用它来测试提议的非线性控制器。这个 Ballard MK5-E 系统共有 35 个电池串联在一起，总有效面积是 232cm^2 。膜电极包括石墨电极和 DowTM 膜。反应气体（氢气和空气）是在电池堆内加湿的，氢气在阳极侧再循环，空气流到阴极。在阳极入口处使用压力调节器把氢气压力控制在 0.3MPa 。在空气出口处使用背压调节器控制 Ballard 燃料电池堆在 0.3MPa 。为了可编程的负载，氧化剂流率自动调节到恒定值 4.5L/s 。通过质量流率表保证在阴极可以除掉足够的水。氢气的补偿速率和消耗速率是相同的。电池堆的温度是在空气出口处测量的，并且通过内部水保持在 $72\sim75^\circ\text{C}$ 的范围内，以便输出最大功率。图 6-3 是 Ballard 系统的简化图。PGS105 系统更像是一个预设控制系统，而不是一个反馈控制系统。在实现控制方案之前，需要优先考虑燃料电池系统和操作者的安全。举例说，为了避免致命事故和严重破坏燃料电池系统，在燃料电池控制系统中必须考虑低电池电压、电池堆过载、高温、氢气泄漏探测和阳极与阴极之间的压力差。

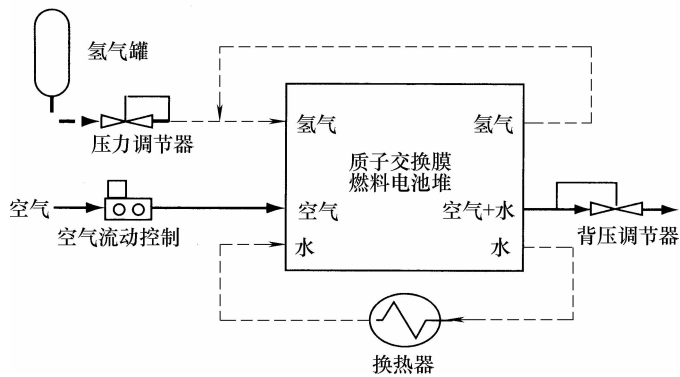


图 6-3 基于 PGS105B 系统的质子交换膜燃料电池堆
(出自 Hamelin, J. et al., *Int. J. Hydrogen Energy*, 26, 625, 2001. 许可使用)

6.2.3 电驱子系统

燃料电池汽车是一种“电驱动”的汽车。燃料电池汽车中牵引电动机转矩的电力来自燃料电池发的电。在燃料电池汽车应用中，可以使用感应电动机、永久磁铁同步电动机和开关磁阻电动机^[23]。在下面的章节中，我们会更详细地解释燃料电池汽车的控制和电驱动系统的合成。

6.3 混合动力汽车和电力汽车的燃料电池系统设计

今天，像丰田 Prius 和本田 Civic Hybrid 这样的内燃机/混合动力汽车（HEVs）很成功。然而，混合动力汽车仍然严重依赖石油。因此，燃料电池汽车将是在混合动力汽车之后的下一代电力汽车。当然在商业化之前，还要解决重新加氢气的基础设施和质子交换膜燃料电池的高成本问题。在介绍燃料电池汽车的结构之前，我们需要先介绍一下混合动力汽车的结构以便更好地明白燃料电池汽车技术。因为燃料电池汽车也是混合动力汽车的一种。因为混合动力汽车使用内燃机和电动机/发电机，所以可以使用几种串联和并联结构。这些混合动力汽车技术通过使用在刹车中的再生能量和储存内燃机惯性滑行的能量来增加效率和燃料经济性。

6.3.1 串联混合动力汽车

在串联混合汽车中，内燃机机械输出首先被发电机转化成电能，转化的电能或者用来为电池充电，或者越过电池通过电动机和机械离合器来驱动车轮（图 6-4）。车上的电池充电器还使用电动机动态刹车能为电池充电。

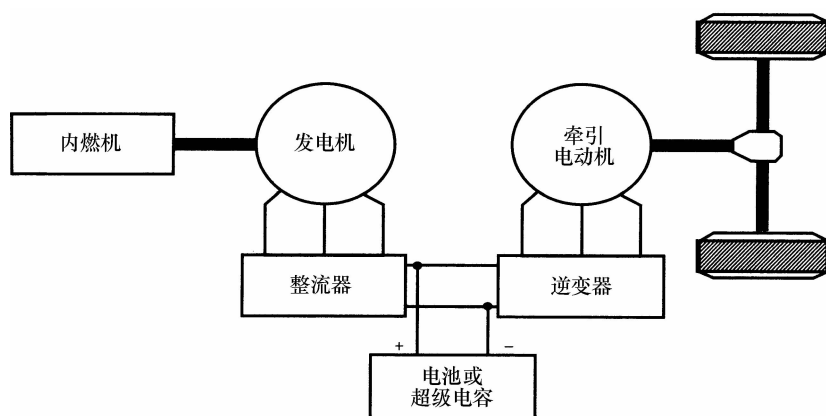


图 6-4 串联混合动力汽车的构成

（出自 Emadi, A. et al., *IEEE Trans. Power Electron.*, 21 (3), 567, 2006. 许可使用）

在串联混合汽车中，因为内燃机与驱动轮是完全脱离的，内燃机可以根据速度-转矩特性，按最佳速度和转矩工作，因此，可以达到最低燃料消耗和最高效率。串联混合汽车的缺点是比其他平行或混合结构效率低，因为它有两个能量转换级（内燃机/发电机和发电机/电动机）。

在串联混合动力汽车中，有六个可能的工作模式^[25]：

- 1) 只用电池模式：发动机关了，汽车只由电池供能。
- 2) 只用发动机模式：能量只来自内燃机/发电机。
- 3) 混合模式：内燃机/发电机和电池一起为牵引电动机供能。

- 4) 功率分开模式：内燃机/发电机功率分开，驱动汽车并且为电池充电。
- 5) 静态充电模式。
- 6) 刹车再生能量模式。

6.3.2 平行混合动力汽车

如图 6-5 所示，在平行混合汽车中，内燃机和电动机平行连接到驱动车轮上。它允许有以下三个选择：①内燃机和电动机；②只是内燃机；③只是电动机。

一般在低速时，适合使用的只是电动机的驱动方案，因为它比内燃机效率更高，而内燃机适合在高速时使用。与串联混合动力汽车相似，在刹车再生能量的过程中，电动机可以用做发电机来为电池充电。当内燃机输出功率大于需求功率时，电池可以从内燃机吸收能量。

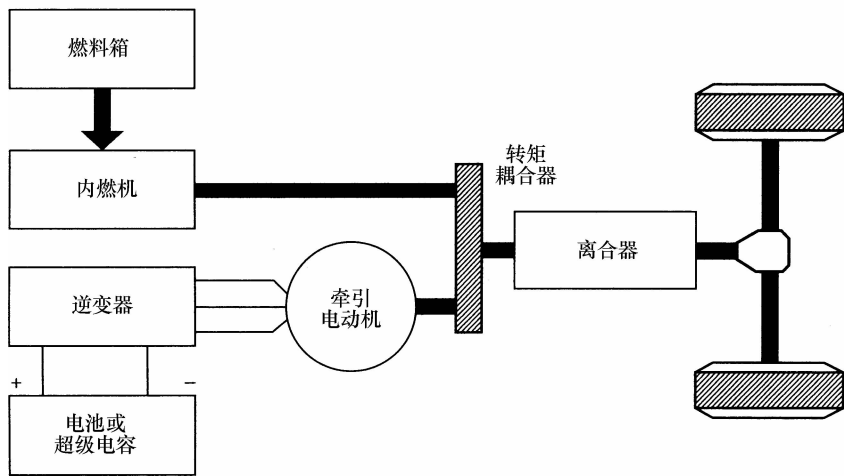


图 6-5 平行混合动力汽车的构成

(出自 Emadi, A. et al. , *IEEE Trans. Power Electron.* , 21 (3) , 567, 2006. 许可使用)

平行混合动力汽车的优点是比串联混合动力汽车的能量转换级少，因此平行混合动力汽车的功率损耗小。平行混合动力汽车的另外一个优点是可以使用小一些的内燃机和小一些的电动机，只要电池能提供足够的能量就可行。以下是平行混合动力汽车的几个可能工作模式^[25]：

- 1) 只用电动机模式：发动机关闭后，汽车只由电动机供能。
- 2) 只用发动机模式：汽车只由发动机驱动。
- 3) 混合模式：内燃机和电动机一起为驱动汽车供能。
- 4) 功率分开模式：内燃机功率分开，驱动汽车并且为电池充电（电动机成为发电机）。
- 5) 静态充电模式。

6.3.3 串联-并联混合电力汽车

为了同时获得串联和并联混合电力汽车的优点，可以考虑使用图 6-6 和 6-7 中的混合模式。在图 6-6 中可以看到，发电机和电动机之间有附加的机械连接。图 6-7 中的复杂混合系统与串联-并联混合电力汽车相似，它们之间的主要区别是，在复杂混合系统中发电机和电动机之间的能量流动是双向的，而在串联和并联混合电力汽车中，发电机的能量是单向流动的。

尽管这些驱动方案受制于高复杂性和高成本，许多混合电力汽车仍然使用混合结构以便可以同时利用串联和并联混合电力汽车的优点。

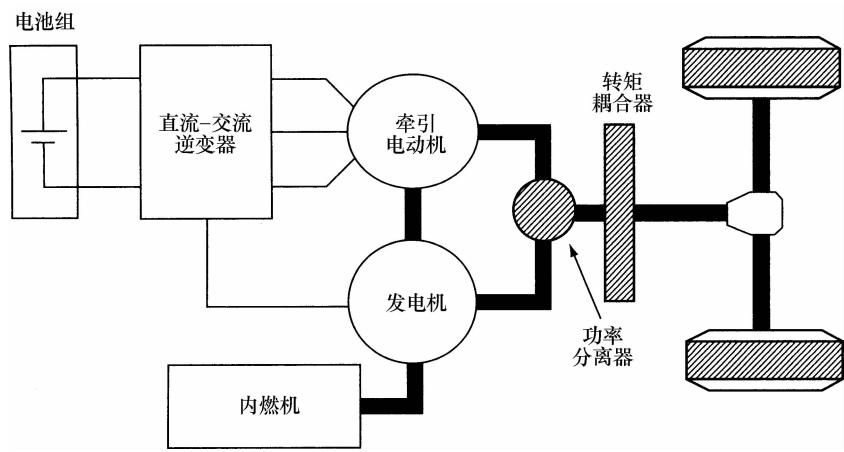


图 6-6 串联-平行混合电力汽车的构成

(出自 Emadi, A. et al. , *IEEE Trans. Power Electron.* , 21 (3) , 567, 2006. 许可使用)

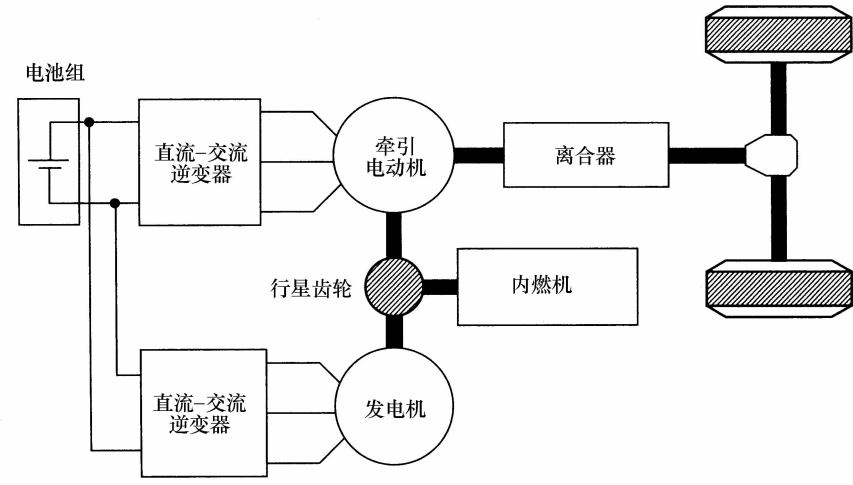


图 6-7 复杂混合电力燃料电池汽车的构成

(出自 Emadi, A. et al. , *IEEE Trans. Power Electron.* , 21 (3) , 567, 2006. 许可使用)

以下是一个复杂混合系统的可能工作模式：

- 1) 只用电动机模式：发动机关闭后，汽车只由电动机供能。
- 2) 只用发动机模式：汽车只由发动机驱动。
- 3) 混合模式：内燃机和电动机一起为驱动汽车供能。
- 4) 功率分开模式：内燃机功率分开，驱动汽车并且为电池充电（电动机成为发电机）。
- 5) 发电模式（如果电池需要充电，发电机会在这个主动模式下工作）。

6.3.4 燃料电池汽车

从图 6-8 和图 6-9 可以看出，燃料电池汽车可以被当做一种串联的混合汽车。

图 6-8 和图 6-9 是典型的混合燃料电池汽车，其中的燃料电池堆直接使用氢气。燃料电池堆用的氢气被储存在汽车内的高压罐里。氢气和氧气的流率随电池堆的电流变化而变化。燃料电池堆的输出提供给功率控制单元（功率转换器），来控制牵引电动机与燃料电池辅助能量存储器（电池和超级电容）的电能分配。辅助能量存储器不仅在加速时提供附加的能量，而且在制动时存储能量。牵引电动机产生动力来驱动汽车。

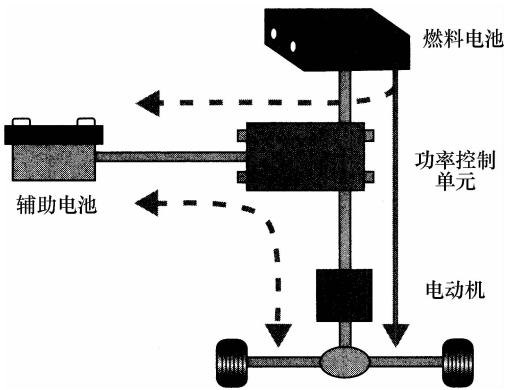


图 6-8 混合动力燃料电池汽车的构成（丰田）

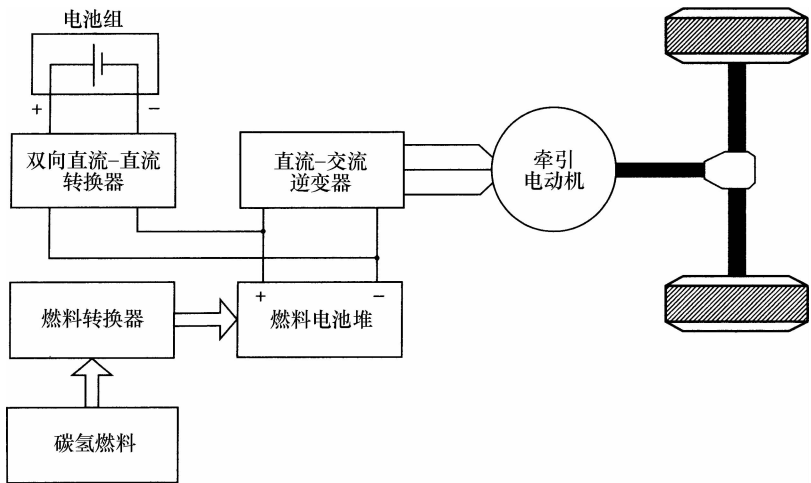


图 6-9 典型的燃料电池汽车构成

（出自 Emadi, A. et al. , *IEEE Trans. Power Electron.* , 21 (3) , 567, 2006. 许可使用）

功率控制单元中的功率调节器必须有最小的功率损耗和高达 80% 的效率。本节讨论如何设立和协调功率管理系统，包括能量存储、电动机、电动机控制器/逆变器和燃料电池汽车的辅助设备。

6.3.4.1 燃料电池汽车的功率管理系统

图 6-10 是燃料电池汽车功率管理系统的详细示意图。

直流-直流转换器用来升高燃料电池的电压。这个转换器的输出直接输入到三相直流-交流逆变器。由于牵引电动机需要交流电压，直流-交流逆变器把直流电转换成三相可变电电压/频率的交流电。燃料电池功率也通过图 6-10 所示另一个的直流-直流转换器提供给在配套设备系统中的其他电动组件，如水泵、风机系统、鼓风机、执行器等。燃料电池系统必须为启动或高峰负载需求供电配备一个辅助电源系统。电池或超级电容用作辅助电源，同时也可用于均衡负载并收集刹车再生能量。辅助电源可以在燃料电池系统的稳态时充电，并在燃料电池系统负载突然变化的瞬态响应时放电。充电和放电过程是通过电池的双向直流-直流转换器实现的。为了简化双向转换器的设计，可以使用如图 6-11 所示的简单降压/升压双向转换器。

在升压模式下，开关 S_2 和二极管 D_1 是开着的，超级电容或电池可以从能量存储装置中释放能量；而在降压模式下，开关 S_1 和二极管 D_2 是开着的，刹车的能量可以存到能量存储装置中。

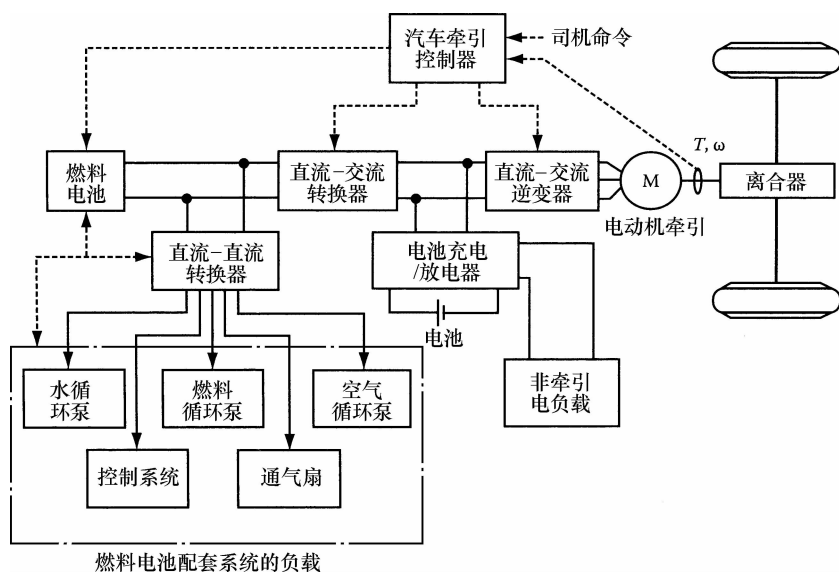


图 6-10 燃料电池汽车功率管理系统的详细示意图

（出自 Emadi, A. et al., *IEEE Trans. Power Electron.*, 21 (3), 567, 2006. 许可使用）

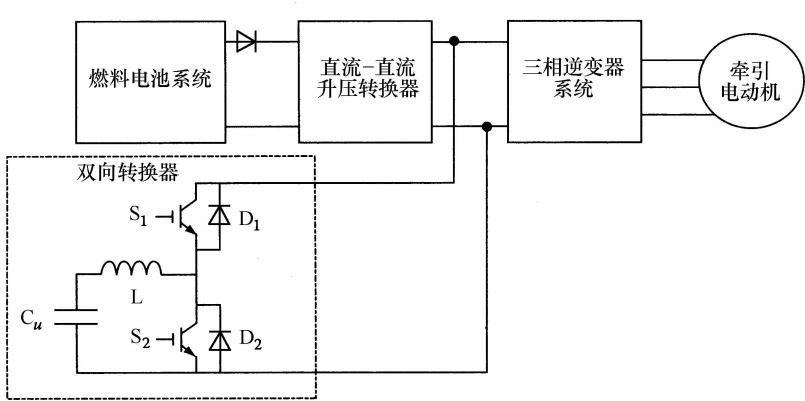


图 6-11 燃料电池汽车的功率管理配置

6.3.4.2 燃料电池汽车的电动机和电动机控制器/逆变器

燃料电池汽车包括几个 300 ~ 400V 的高压部件，如牵引电动机、逆变器驱动系统、电池、直流-直流转换器等。

燃料电池汽车电动机的电力需求范围是 75 ~ 120kW。随着电力电子和微控制器的巨大进步，结构紧凑、低成本、高效率的逆变器使燃料电池汽车使用交流感应电动机和无刷永磁电动机成为可能。一般说来，与直流有刷电动机相比，这些电动机在很大范围内都提供高效率，但这些发动机需要复杂的控制计划，如空间向量脉宽调制（Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM），通过处理电流和转子位置的反馈信号来得到所需的转矩。牵引电动机在燃料电池汽车中扮演重要角色。牵引电动机汽车应用的主要特点是^[26]：

- 高转矩密度和功率密度。
- 在低速启动和爬山时的高转矩，在高速度巡航时的高功率。
- 在基准速度 3 ~ 4 倍的大速度范围内，以恒定功率工作是机器峰值扭矩要求和逆变器伏安额定值之间很好的折中。
- 在很大的速度和转矩范围内（包括低转矩），可以高效率地工作。
- 间歇过载能力通常是短持续时间额定转矩的两倍。
- 适宜高可靠性和耐用性的汽车环境。
- 可接受的成本。

图 6-12 所示是用于牵引的永久磁铁同步或永久磁铁无刷电动机、感应电动机和开关磁阻电动机。

图 6-13 所示的是牵引应用所需的转矩/功率-速度特性。图 6-14 所示的是为这些应用的理想化转矩/功率-速度特性。

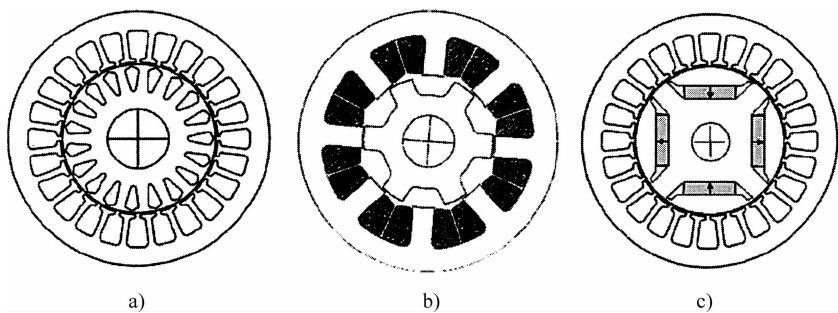


图 6-12 主要的牵引机技术^[30]

a) IM, Induction Machine 感应电动机 b) SRM, Switched Reluctance Machine 开关磁阻电动机
c) PMM, Permanent Magnet Machine 永久磁铁电动机

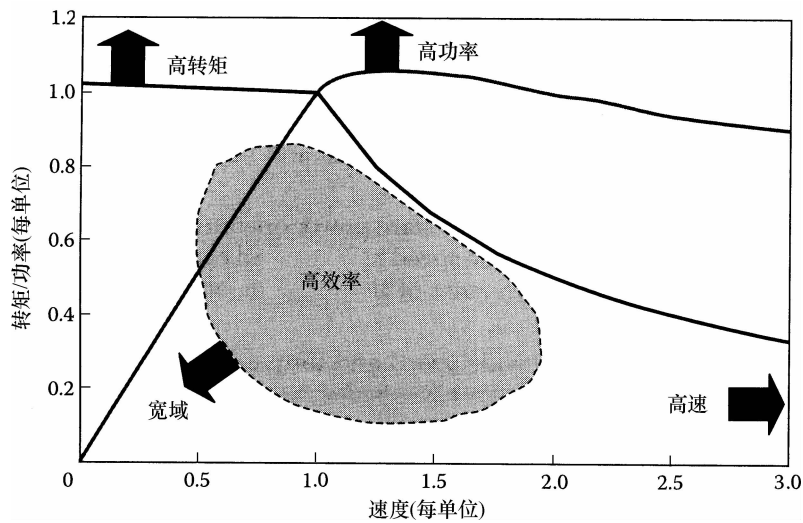


图 6-13 牵引机的转矩和功率需求

(出自 Zhu, Z. Q. and Howe, D., Proc. IEEE, 95 (4), 746, 2007. 许可使用)

在图 6-14 中，可以看到三个转矩/功率的区域。在恒定转矩区 I，尤其是在低速区，最大转矩能力是由逆变器的额定电流和逆变器输出电压大小对逆变器频率的比值决定的，而且是被调整来保持这个区域的气隙磁通恒定的^[27]；当达到最大逆变器电压时，恒定转矩区 I 就切换到恒定功率区 II。在这个区域里，定子电压保持在额定值，同时调节定子电流来获得恒定功率^[28]。由于逆变器的电压和电流限制，电动机工作在弱磁通区。在这种模式下，随着频率的不断增加，通过增加转差率来维持定子电流在极限以内，按低气隙磁通工作；当转差率达到对应于拉出转矩的值时，区域 II 切换到区域 III。在区域 III，定子电压保持在额定值，并且调节转差率略低于其拉出转矩值。转差率将一直保持略低于其拉出转矩值。因为背向电动势

(Back Electromotive Force, EMF) 的影响越来越大, 转矩和功率降低。在牵引应用中, 需要很大范围的速度控制, 甚至超出恒定功率区域。

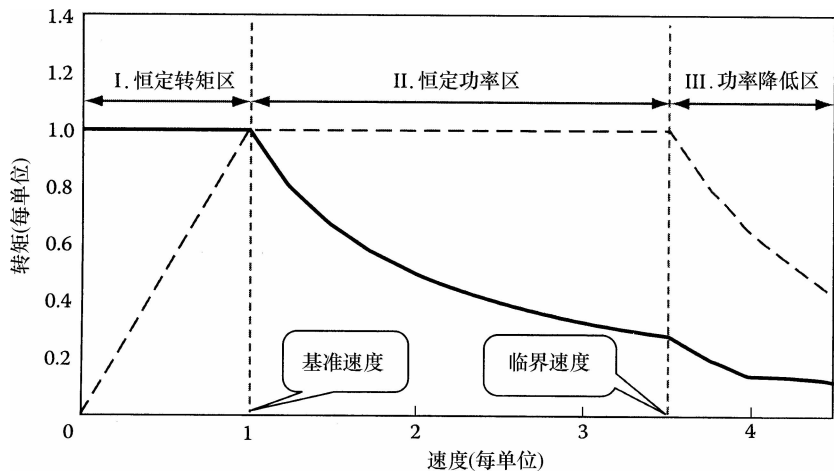


图 6-14 牵引机应用的理想化转矩/功率-速度特性曲线
(出自 Zhu, Z. Q. and Howe, D., *Proc. IEEE*, 95 (4), 746, 2007. 许可使用)

由于感应电动机简单可靠, 而且有很大的速度范围, 它很适合牵引应用。因为感应电动机可以用 $d-q$ 模型模拟, 其性能就像直流电动机^[25], 所以通过磁场定向控制 (向量控制), 或直接转矩控制, 就可以得到良好的动态转矩控制性能。然而, 因为转子有损耗, 而且体积比同等功率和速度级的永磁电动机大, 感应电动机的效率比永磁电动机的要低。永磁电动机具有高效率、高转矩和高功率密度, 但与感应电动机相比, 它的固定范围短, 会限制磁场削弱能力。开关磁阻电动机对于牵引应用也是一个好的选择, 因为它的结构简单和坚固、控制简单、具有极高操作速度的能力以及运作无公害^[25]。但是, 开关磁阻电动机并没有被广泛采用, 而且比其他电动机更昂贵。电动机控制器-逆变器系统用绝缘栅双极晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBT) 作为高功率开关器件, 把电池或燃料电池的直流电转换成交流电来控制交流和无刷永磁电动机。

6.3.4.3 燃料电池汽车中的辅助系统

燃料电池汽车中的辅助系统, 如泵、空调、各种传感器和电子驱动系统的仪表, 可以在标准 42V 电压或 12V、140V、300V 电压下工作。辅助系统和其他系统必须保持高效率、低电磁接口、电磁兼容性、和低成本。设计改变/优化因为不同厂家和车型而不同。混合燃料电池汽车的基本设计规则, 是考虑如何构建功率管理系统、电动机、电动机控制器和上面提到的辅助系统。通过精简相关的电驱动系统和元件, 可以降低成本。

6.4 用于电力汽车的混合燃料电池系统控制

根据在第6.2节的燃料电池汽车部件介绍,燃料电池汽车有三个主要的控制模块,包括:电源的动力传动系统控制,电动机/逆变器控制,以及包括燃料处理器的燃料电池控制。使用燃料处理器可能会使系统非常复杂。尽管关于燃料电池处理器详细的控制介绍超出了本书范围,但是我们会介绍燃料电池处理器的简化控制。

6.4.1 动力传动控制

动力传动控制系统管理所有司机的信号和系统工作状态信号,如关键态(启动或关闭)、加速踏板的位置、选择挡或制动踏板的位置、主缸压力、温度、速度的显示、转矩、电流和里程等。根据道路状况和汽车能力而得到电动机所需功率,然后主微处理器计算所需的电流信号,并把电流信号送入燃料电池控制和功率控制模块。因为传动系统的控制与燃料电池汽车功率控制密切相关,所以下面的介绍将有助于认识传动系统控制。

6.4.2 功率控制

1. 功率控制

功率控制模块根据电动机功率需求和能量存储器的能量水平,控制燃料电池系统、能量存储器(电池或超级电容器)和动力传动系统之间的功率流。下面给出三个功率控制模式^[24]:

1) 静止模式:这是一个空闲模式。无论是燃料电池系统,还是能量存储器都不工作。

2) 制动方式:燃料电池系统不工作,但能量存储器吸收制动再生能量直到被完全充满。

3) 牵引模式:在牵引模式中有两种情况。一种是混合模式,另一种是单独模式。在混合模式下,如果电动机需求输入功率 P_{comm} 比燃料电池总额定功率 P_{fc} 高,混合模式启动。因此,燃料电池系统在最佳工作范围内产生额定功率,而其余的功率($P_{\text{comm}} - P_{\text{fc}}$)是由能量存储器提供的。在单独模式下,如果电动机需求输入功率比燃料电池额定功率低,那么燃料电池与电动机的功率差被能量存储器吸收,直至达到最高充电水平。在这种情况下,燃料电池系统是驱动汽车的唯一电源。

一旦被完全充电后,能量存储系统单独驱动汽车,直至能量存储系统的能量达到最低水平。

2. 逆变器控制

现在,实时微处理器使先进的交流感应电动机逆变器开关方法成为可能。这些方法包括空间向量脉宽调制(SVPWM)和向量控制法等。空间向量脉宽调制是一种特殊的技术,用在三相电压源逆变器中确定三个功率晶体管上级电源的开关顺序。与正弦脉宽调制相比,它不但可以在电动机绕组负载的输出电压或电流中减少

谐波失真，而且可以更有效地使用直流输入电压。为了向量控制交流感应电动机，需要建立详细的模型。在附录 C 和 E 中，详细介绍了感应电动机模型、向量控制和空间向量脉宽调制在混合动力汽车中的应用。在附录 D 中，解释了感应电动机建模的坐标变换和向量控制。在这里，我们要简要地介绍直接和间接磁场定向控制方案。自从引进定向控制以来，间接磁场定向控制法已经更受欢迎，因为它比直接控制法更可行来实现可靠和精确的速度和转矩控制。直接法用电法通过场角位置传感器确定转子磁通位置；而间接法通过转子转差速率的计算来确定转子磁通。这个定向控制基于三个因素：①电动机电流和电压空间向量；②把三相速度和时间依赖系统变换成两个坐标不随时间变化的系统；③有效的脉宽调制图形生成^[28]。由于这些因素，交流电动机可以像直流电动机一样模拟，来实现良好的瞬态和稳态控制性能。磁场定向控制机有两个组件：转矩组件（与 q 坐标对齐）和通量组件（与 d 坐标对齐）。在图 6-15 所示的常规间接向量控制中， d -轴电流产生的磁通被控制为常数，而 q -轴电流产生的转矩被控制使电动机按最大输出功率的速度工作。转矩可以通过调节 i_{qs}^e 和转差率 $\omega_e - \omega_r$ 来控制。转子磁场可以通过 i_{ds}^e 控制^[27]。这种间接向量控制的主要缺点是对电动机参数过于敏感，因此，对控制增益精度要求很高（图 6-15）。

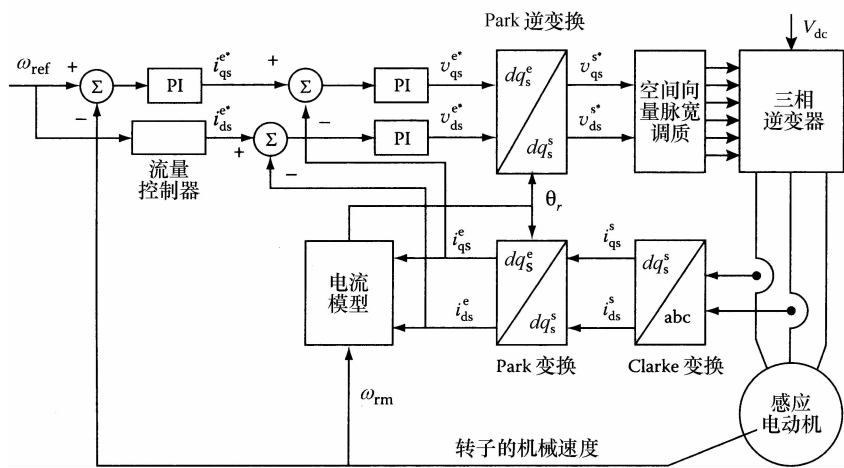


图 6-15 感应电动机的间接向量控制方案

（出自 Toluyat, H. and Campbell, S., *DSP-Based Electromechanical Motion Control*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2006. 许可使用）

6.4.3 燃料电池控制

首先，燃料电池根据负载电流变化而有反应物的持续供应，因此，必须适当地控制内部状态（湿度、温度和压力）和外部输入（氢气和氧气），以避免缺乏反应

物。燃料电池系统的温度通过湿度控制器和温度控制器调节达到稳定的状态。燃料电池冷启动的能量由备用电池提供（图 6-16）。

使用微处理器或数字信号处理器，可以控制内部状态和内部输入。图 6-16 所示的是控制方案。在图 6-16 中，发出控制命令来开启和关闭系统的氢气电磁阀和排气阀。空气压缩机的速度根据电流需要而变化。通过控制冷却风扇的速度，可以用空气压缩机来调节燃料电池堆的温度。通过调节冷却风扇的速度，燃料电池的工作温度保持在 65°C 。此外，通过控制阳极和阴极侧的执行器，可以减小阳极和阴极的压力差来延长电池堆的寿命。

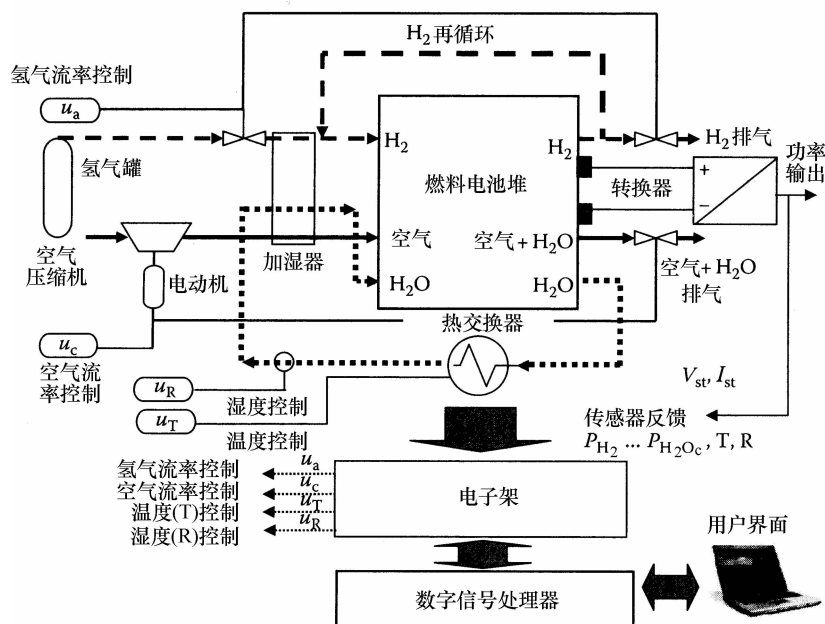


图 6-16 燃料电池控制的简化实验装置

（出自 Na, W. K. and Gou, B., *IEEE Trans. Energ. Convers.*, 23 (1), 179, 2008。许可使用）

6.4.4 燃料处理器或转化器

在文献 [30] 中，介绍了一个通过转化甲醇生成氢气的转化器简化模型。利用二阶传递函数模型，给出如下燃料流率随甲醇输入阶跃变化响应的数学形式：

$$\frac{q_{\text{H}_2}}{q_{\text{methanol}}} = \frac{CV}{\tau_1 \tau_2 s^2 + (\tau_1 + \tau_2)s + 1} \quad (6-9)$$

式中 q_{H_2} ——氢气流率（mol/s）；

q_{methanol} ——甲醇流率（mol/s）；

CV ——转换因子（kmol 氢气/mol 甲醇）；

τ_1 、 τ_2 ——转化器时间常数 [s]。

图 6-17 所示是一个比例积分控制器，根据电流，通过控制氢气流率来确定甲醇流率。氧流率是由氢气-氧气流率比 r_{H-O} 来确定的。

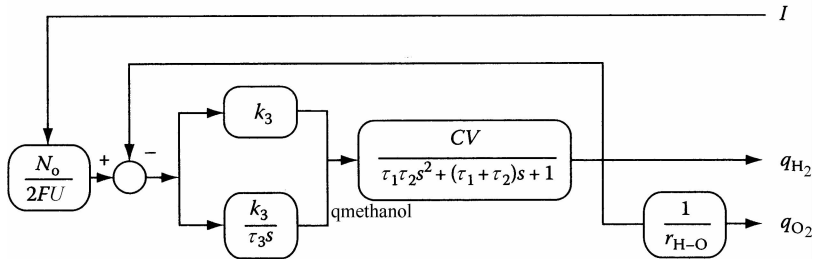


图 6-17 转化器和转化器控制器模型

(出自 El-Sharkh, M. Y. et al. , *IEEE Trans. Power Delivery*, 19 (4), 2022, 2004。许可使用)

注意: I 是电池堆电流 (A); N_0 是电池堆中串联的电池数; F 是法拉第常数 (C/kmol); U 是燃料利用因子; k_3 是比例积分控制器增益; τ_3 是比例积分控制器时间常数; q_{O_2} 是氧气流率 (mol/s); r_{H-O} 是氢气-氧气流率比。

6.5 混合燃料电池系统的故障诊断

故障诊断是检测、隔离并确定将要发生的或初期的故障状态——在混合燃料电池系统中受影响的组件尽管性能下降却仍然可能工作。在本节中，我们将用实际的系统 Nexa 1.2kW 燃料电池堆^[31]来介绍故障诊断的有关问题和步骤。

6.5.1 燃料电池堆

1.2kW Nexa 燃料电池堆输出电压随功率从空载 43V 变化到满负载 26V。在工作中，通过检测燃料电池堆电压来达到故障诊断、控制和保证安全的目的。电池电压检查器通过监测一对电池的性能来探测是否其中一个电池是坏的。如果探测到有一个电池发生故障或有潜在的不安全状态，这个 Nexa 燃料电池堆就会被关闭。

6.5.2 氢气供应系统

燃料供应系统监测并调节供应给燃料电池堆的氢气。燃料（氢气）供应系统主要关心的是燃料电池氢气供应的安全。在以下组件中，考虑到了燃料供应：

- 压力传感器监测燃料输送状态，以确保 Nexa 系统的工作有足够的燃料供应。
- 泄压阀保护下游组件不会有超压状态。
- 当不工作时，电磁阀阻断燃料供应。
- 压力调节器保证氢气在适当的压力下供应给燃料电池。
- 氢气泄漏检测器监视燃料输送组件附近的氢气水平。为了产品的安全，还安装了警告和关闭报警器。
- 在阳极侧氮气和水的积累会降低燃料电池的性能，这可以用清除电池电压来监测。在电池出口的氢气清除阀定期开放来冲掉阳极惰性成分以恢复性能。

只有少量的不到总燃料消耗率的百分之一的氢气被从系统中清除。清除的氢气先排入冷却空气流，再离开 Nexa 系统。氢气迅速扩散进冷却空气流，并稀释到远低于可燃性下限。在冷却空气排气口安装了氢气泄漏检测器，以确保没有达到可燃性下限。

6.5.3 空气、加湿器和水管理系统

像阳极侧一样，阴极侧也需要两个执行器来同时控制压力和空气流率。这两个执行器可以减小阳极和阴极之间的压力差，并控制通过压缩机的空气流率。燃料电池的输出电压在很大程度上依赖于空气流率。

做氧化剂的空气要先加湿才能使燃料电池正常工作。过多产生的水会造成水泛滥，导致电池电压的损失。因此，多余的水需要被蒸发到周围环境，或者副产品水需要通过水管理系统收集排出。不过，水太少也会导致膜干燥，这是电池电压降低的一个原因。通过监测电池的工作电压，电池水泛滥或干燥都会被预警。

6.5.4 氢气扩散和冷却系统

氢气迅速扩散到冷却空气中，稀释到远低于可燃性下限。为安全起见，在冷却空气排气口有氢气传感器为控制系统提供反馈。如果氢气浓度接近可燃性下限的 25%，控制系统会产生预警和报警信号。下面是氢气浓度可燃性下限的定义：如果与空气混合并点燃，可以支持自蔓延燃烧的最小氢气浓度。当浓度低于可燃性下限时，没有足够的燃料可以支持燃烧。氢气可燃性下限按体积是 4%。

6.5.5 安全电子系统

根据严重程度，异常或不安全的工作状态会引发预警或警报，并可能导致自动关机。在预警中，Nexa 电源模块会继续工作，而控制器会试图改进状况。在报警中，控制器会启动一个控制的关机顺序。有两种错误状态级别^[4]：

1) 一级错误。

- 低电池电压：如果电池电压降低到低于 0.3V，报警。
- 电池堆超载：根据电池堆功率容量而变化。如果使用了 125% ~ 150% 的额定电流，会激活报警信号。
- 高温度：温度超过 87.4°C。

2) 二级错误。在这种情况下，强制系统中断所有组件电源，所有阀被设置到它们的初始条件。

- 高氢气浓度水平：根据氢气传感器，当氢气水平超过可燃性下限的 15%，会触发早期报警；当氢气水平超过可燃性下限的 25%，会开启错误信号。
- 压力差保护：如果阳极和阴极之间的压力差超过 0.5bar，会开启错误信号。

参 考 文 献

1. J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, New York: Wiley, 2002.
2. K. Rajashekrara, Propulsion system strategies for fuel cell vehicles, SAE paper 2000-01-0369, 2000.
3. F. Barbir and T. Gomez, Efficiency and economics of PEM fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 22(10/11), 1027–1037, 1997.
4. C.A. Anderson, M.O. Christensen, A.R. Korsgaard, M. Nielsen, and P. Pederson, Design and control of fuel cells system for transport application, Aalborg University, Project Report, 2002.
5. J. Purkrushpan and H. Peng, *Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis and Feedback Design*, Germany: Springer, 2004.
6. F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, London: Elsevier Academic Press, 2005.
7. J. Hamelin, K. Abbossou, A. Laperriere, F. Laurencelle, and T.K. Bose, Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary application, *International Journal of Hydrogen Energy*, 26, 625–629, 2001.
8. W. Na and B. Gou, Nonlinear control of PEM fuel cells by feedback linearization, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(1), 179–190, 2008.
9. J. Purkrushpan, A.G. Stefanopoulou, and H. Peng, Control of fuel cell breathing, *IEEE Control Systems Magazine*, 24(2), 30–46, 2004.
10. J. Purkrushpan, A.G. Stefanopoulou, and H. Peng, Modeling and control for PEM fuel cell stack system, *Proceedings of the American Control Conference*, Anchorage, AK, 2002, pp. 3117–3122.
11. J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppy, P.R. Roberge, and A. Rodrigues, Parametric modeling of the performance of a 5-kW proton exchange membrane fuel cell stack, *Journal of Power Sources*, 49, 349–356, 1994.
12. J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppy, and P.R. Roberge, Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell, *Journal of Electrochemical Society*, 142(1), 9–15, 1995.
13. R.F. Mann, J.C. Amphlett, M.A. Hooper, H.M. Jesen, B.A. Peppy, and P.R. Roberge, Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, 86, 173–180, 2000.
14. M.J. Khan and M.T. Labal, Dynamic modeling and simulation of a fuel cell generator, *Fuel Cells*, 1, 97–104, 2005.
15. M.J. Khan and M.T. Labal, Modeling and analysis of electro chemical, thermal, and reactant flow dynamics for a PEM fuel cell system, *Fuel Cells*, 4, 463–475, 2005.
16. M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M.S. Alamm, A.A. Sakla, P.C. Byrne, and T. Thomas, Analysis of active and reactive power control of a stand-alone PEM fuel cell power plant, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(4), 2022–2028, 2004.
17. P. Famouri and R.S. Gemmen, Electrochemical circuit model of a PEM fuel cell, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 3, 13–17, 2003.
18. A. Sakhare, A. Davari, and A. Feliachi, Fuzzy logic control of fuel cell for stand-alone and grid connection, *Journal of Power Sources*, 135(1–2), 165–176, 2004.
19. P. Almeida and M. Godoy, Neural optimal control of PEM fuel cells with parametric CMAC network, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(1), 237–245, 2005.

20. L.Y. Chiu, B. Diong, and R.S. Gemmen, An improved small-signal mode of the dynamic behavior of PEM fuel cells, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(4), 970–977, 2004.
21. J. Sun and V. Kolmannovsky, Load governor for fuel cell oxygen starvation protection: A robust nonlinear reference governor approach, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 3(6), 911–913, 2005.
22. W. Na and B. Gou, A Thermal Equivalent Circuit for PEM Fuel Cell Temperature Control Design, 2008 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Seattle, WA, May 2008.
23. W. Yang, B. Bates, N. Fletcher, and R. Pow, Control challenges and methodologies in fuel cell vehicle development, SAE paper 98C054, 1998.
24. A. Emadi, S.S. Williamson, and A. Khaligh, Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(3), 567–577, 2006.
25. C.C. Chan, The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles, *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704–718, 2007.
26. Z.Q. Zhu and D. Howe, Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles, *Proceedings of the IEEE* 95(4), 746–765, 2007.
27. C.M. Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
28. Texas Instruments Literature Number BPRA073, Field Oriented Control of 3-Phase AC motors, February 1998.
29. H. Toluyat and S. Campbell, *DSP-Based Electromechanical Motion Control*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.
30. K.H. Hauer, Analysis tool for fuel cell vehicle hardware software (control) with an application to fuel economy comparisons of alternative system designs, PhD dissertation, Department of Transportation Technology and Policy, University of California, Davis, CA, 2001.
31. Ballard Power Systems Inc., *Nexa TM Power Module User's Manual MAN5100078*, Burnaby, BC, Canada: Ballard Power Systems Inc., October 2005.

第7章 燃料电池在公用电力系统和独立系统中的应用

7.1 简介

从亚千瓦的便携式燃料电池到数兆瓦的燃料电池发电厂正在兴起，为我们提供清洁高效的能源。这项新技术适合为住宅、商业和工业用户供电、供暖。因为其具有的高燃料转换效率、产热和发电的灵活性、易选址、几乎可以忽略的环境排放和低二氧化碳排放量，燃料电池被认为是一系列发电应用的首选技术。在现有的各种燃料电池中，质子交换膜燃料电池（PEMFC）被视为便携式、车辆和住宅应用的首选系统。

在美国，联邦能源管理委员会颁布了若干规则和立法草案公告，为放松公用电力管制设置了路线图。美国加州的能源危机已经引起高度重视，并引发了能源行业内的激烈讨论。一种可能的解决方案是重振综合资源规划的理念，在放松管制的电力系统中，通过传统的和可再生能源发电设施，推广分布式发电（Distributed Generation, DG）。与质子交换膜燃料电池低温工作相关的技术挑战包括水管理、散热、阳极碳氢化合物衍生燃料中的微量一氧化碳毒素。

对于住宅和小型商业用户，燃料电池是最有希望的可再生能源技术。燃料电池是静态能量转换装置，能够把化学能转换成电能。与传统发电系统相比，它们有很多优点，例如高效率、零或低排放（污染气体）和灵活的模块结构。燃料电池是非常有前途的能源，人们期待它未来在分布式发电应用中起到非常重要的作用。

一般人们期望用可再生能源发电设施与公用电网互联来实现调峰，减少需求，并作为应急备用电源。然而，这样的互联也产生新的问题需要研究解决，包括控制方案设计、功率管理、公用电力连接保护和设备保护之间的不匹配等。燃料电池分布式发电机可以连接到公用网络来加强电力系统，也可以安装在偏远地区来独立供电。本章主要介绍燃料电池在公用电力系统中独立系统中的应用。

7.2 公用电力系统和住宅应用

燃料电池最重要的应用是公用电力系统。频繁发生的故障和配电系统的大波动是电力供应中断的主要原因。从偏远地区的发电厂通过输电网络传输能量也增加了能源成本。一般希望在客户附近安装可再生能源发电设施，以避免电力供应频繁中断和高电能成本。本节将讨论燃料电池在分布式系统中的安装技术。

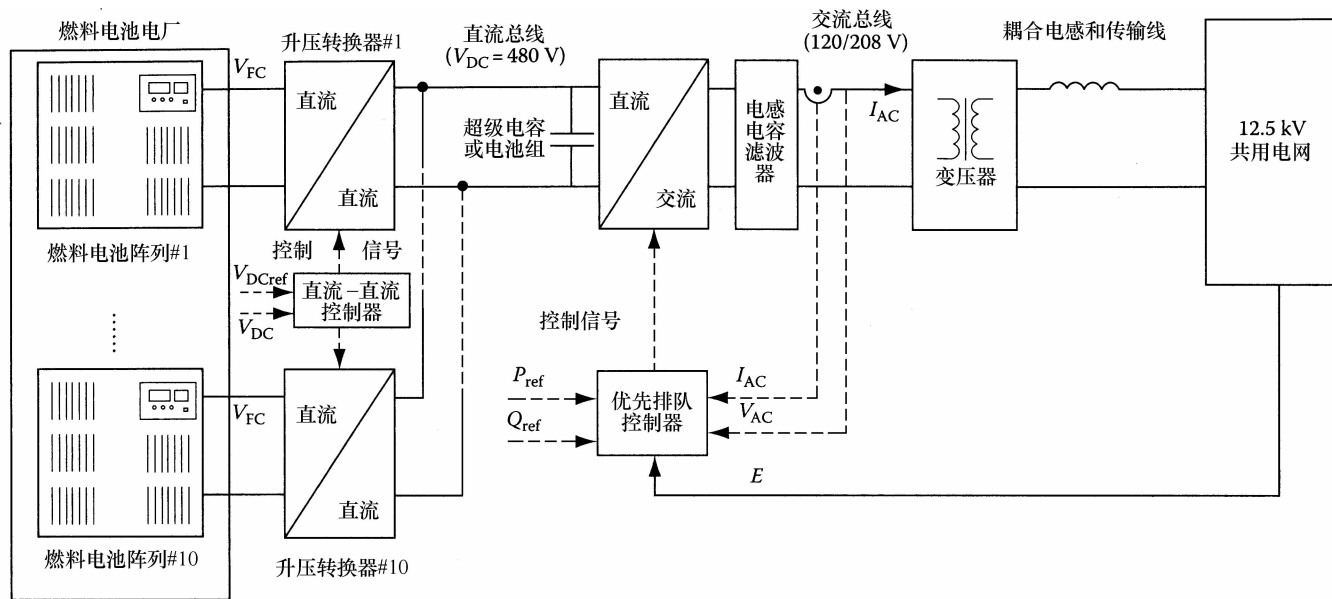


图 7-1 一个燃料电池分布式发电系统的框图 (来自 Wang, C. et al., *IEEE Trans. Energy Conver.*, 21, 586, 2006. 许可使用)

7.2.1 燃料电池分布式发电系统的模拟和控制

如图 7-1 所示，Wang 等人^[1]提出了燃料电池的一个典型分布式发电系统。该系统的配置参数列于表 7-1。质子交换膜燃料电池电厂包括 10 个平行连接的燃料电池阵列。每个阵列的功率是 48kW，一共是 480kW。升压转换器根据直流母线电压，调节每个燃料电池阵列的输出电压。此外，三相六开关逆变器把直流母线上的电能转换成交流电能。在逆变器之后，是电感电容滤波器，其次是变压器，把交流电压从 208V 提高到公用电网的 12.5kV 电压。

表 7-1 提议系统的配置参数

燃料电池发电厂	216V/480kW
	10 个 48kW 燃料电池阵列平行连接
燃料电池阵列	216V/48kW, 包括 8 个(串联) × 12 个(平行)
	500W 燃料电池堆
升压电流-直流转换器	200V/480V, 每个 50kW
	10 个单元平行连接
三相直流-交流逆变器	480V DC/208V AC, 500kW
电感电容滤波器	$L_f = 0.15\text{mH}$, $C_f = 306.5\mu\text{F}$
升压变压器	$V_n = 208\text{V}/12.5\text{kV}$, $S_n = 500\text{kW}$
	$R_1 = R_2 = 0.005\text{p. u.}$, $X_1 = X_2 = 0.025\text{p. u.}$
耦合电感	$X = 50\Omega$
传输线	0.5km 钢芯铝线 6/0
	$R = 2.149\Omega/\text{km}$, $X = 0.5085\Omega/\text{km}$
直流总线电压	480V
交流总线电压	120/208V

7.2.1.1 质子交换膜燃料电池模拟

为了简化分析，我们做如下假设^[2]：

- 1) 一维处理。
- 2) 气体是理想均匀分布的。
- 3) 在燃料电池的气流通道里压力是恒定的。
- 4) 燃料是加湿的，氧化剂来自加湿的空气；假设阳极有效汽压是饱和汽压的 50%，阴极有效汽压是饱和汽压的 100%。
- 5) 燃料电池在 100℃ 以下工作，反应产物是液态的。
- 6) 在电池堆平均温度下评估热动力特性，整个电池堆的温度变化是可忽略的；假设电池堆的总热容量是常数。
- 7) 单独电池的参数可以加起来代表整个电池堆的参数。

7.2.1.2 等效电路

根据假设, 燃料电池的输出电压是

$$V_{\text{out}} = E - V_{\text{C}} - V_{\text{act1}} - V_{\text{ohm}} \quad (7-1)$$

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln(p_{\text{H}_2}^* \cdot \sqrt{p_{\text{O}_2}^*}) - E_{\text{d}}$$

$$V_{\text{C}} = -\frac{RT}{zF} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{\text{limit}}}\right)$$

$$V_{\text{act1}} = \eta_0 + a(T - 298)$$

$$V_{\text{ohm}} = IR_{\text{ohm}}$$

式中 R ——气体常数, $8.3143[\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$;

E_0 ——标准态 (298K 和 1 大气压) 的标准参考势能;

T ——温度 (K);

$p_{\text{H}_2}^*$ ——氢气分压的有效值;

$p_{\text{O}_2}^*$ ——氧气分压的有效值;

I ——电池电流 (A);

I_{limit} ——限制电流 (A);

z ——参与电子数;

F ——法拉第常数 ($96487\text{C}/\text{mol}$);

R_{ohm} ——膜和电极间的导电电阻;

η_0 —— V_{act} 中不随温度变化的部分 (V);

a ——Tafel 方程中的常数项 (V/K)。

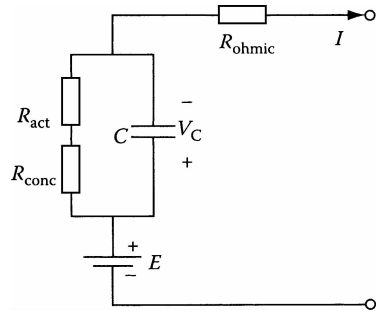


图 7-2 燃料电池内部双层充电效应的等效电路

从式 7-1, 我们可以得到如图 7-2 所示的燃料电池电压等效电路。

7.2.1.3 热动力学的能量平衡

导致燃料电池外壳温度变化的净热是由内部化学反应产生的, 可以表示如下:

$$\dot{P}_{\text{net}} = \dot{P}_{\text{chem}} - \dot{P}_{\text{elec}} - \dot{P}_{\text{sens} + \text{latent}} - \dot{P}_{\text{loss}} \quad (7-2)$$

式中, $\dot{P}_{\text{net}}$ 、 $\dot{P}_{\text{chem}}$ 、 $\dot{P}_{\text{elec}}$ 、 $\dot{P}_{\text{sens} + \text{latent}}$ 和 $\dot{P}_{\text{loss}}$ 分别是燃料电池净能量、化学能、电能、感热和潜热及热损失。文献 [2] 给出了它们的值。

7.2.1.4 质子交换/电解质膜燃料电池的控制设计

我们为升压直流-直流转换器和三相电压源逆变器设计了两个控制器。

7.2.1.4.1 升压直流-直流转换器的控制器

设计升压直流-直流转换器的控制器, 首先需要建立它的状态空间模型。

图 7-3 中所示的是升压直流-直流转换器的等效电路。

以下是升压直流-直流转换器的小信号状态空间模型^[1]:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L_{dd}} \\ \dot{v}_{C_{dd}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-(1-D)}{L_{dd}} \\ \frac{1-D}{C_{dd}} & \frac{-1}{RC_{dd}} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{X_2}{L_{dd}} \\ \frac{-X_1}{C_{dd}} \end{bmatrix} u \tag{7-3}$$
$$V_{dd\_out} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_{dd}} \\ v_{C_{dd}} \end{bmatrix}$$

式中， X_1 和 X_2 分别是 $i_{L_{dd}}$ 和 $v_{C_{dd}}$ 的稳态值， D 是额定工作点的脉冲占空比。图 7-3 给出了其他变量。

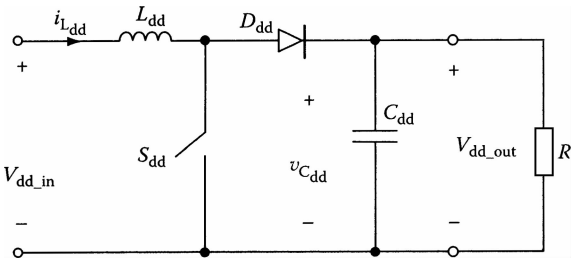


图 7-3 升压直流-直流转换器的等效电路

根据式 (7-3)，我们设计了一个比例积分控制器。表 7-2 给出了其中的参数。

表 7-2 升压直流-直流转换器的参数

L_{dd}	1. 2mH	X_1	250 A
C_{dd}	2 500μF	X_2	480 A
D_N	0. 583 3	K_{di}	20
R (等效负载)	4. 608Ω	K_{dp}	0. 02

7. 2. 1. 4. 2 三相电压源逆变器的控制器

为了满足电压调节，并实现有功功率和无功功率控制，我们为逆变器设计了三相脉宽调制控制器。在这个设计中，我们用电压调节器来采集 dq 坐标实际输出电压 ($V_{d,q}$) 和参考电压 ($V_{d,q(ref)}$) 之间的误差信号，并为电流控制回路产生电流参考信号 ($I_{d,q(ref)}$)。图 7-4 给出的是三相电压源逆变器的总体控制设计方案^[1]。

7. 2. 2 操作方案

在本节中，我们将介绍用于住宅的燃料电池热电联产概念^[3]。最近有人开始使用住宅燃料电池。然而，我们还需要更多地研究氢气网络、氢气能源社会、热电联产方式中回收热量的使用、燃料电池氢气的生产和传输。我们现在既没有明确的蓝图，也没有明确路线来实现未来氢气能源社会^[4,5]。当大量使用分布式发电系统

时，为了避免混乱并维护电力系统的可靠性，我们需要有协调合作的运作方式和分级控制。

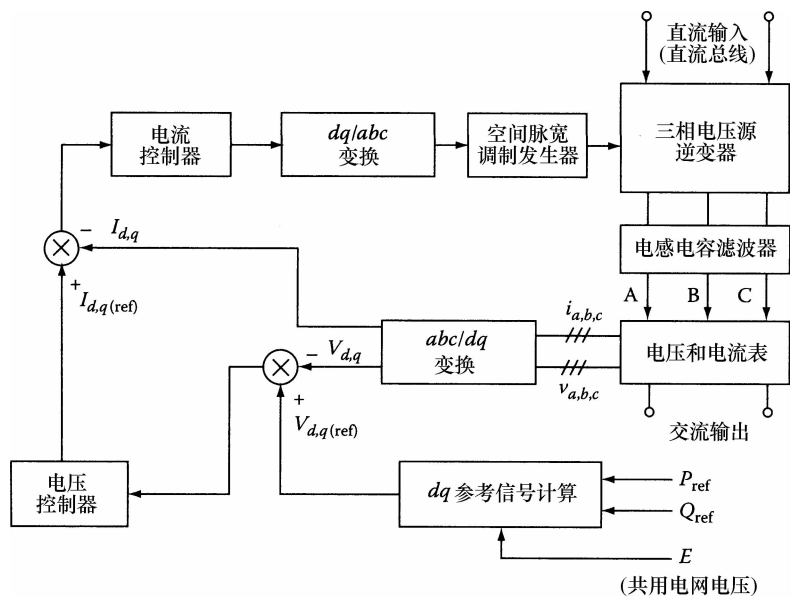


图 7-4 三相电压源逆变器的总体控制设计方案

在图 7-5^[3]中介绍了一个网络化燃料电池的热电联产概念。其中有五个家庭都连接到能源网络上。该网络提供现有电网电能和燃料电池电能之间的互换。这里安

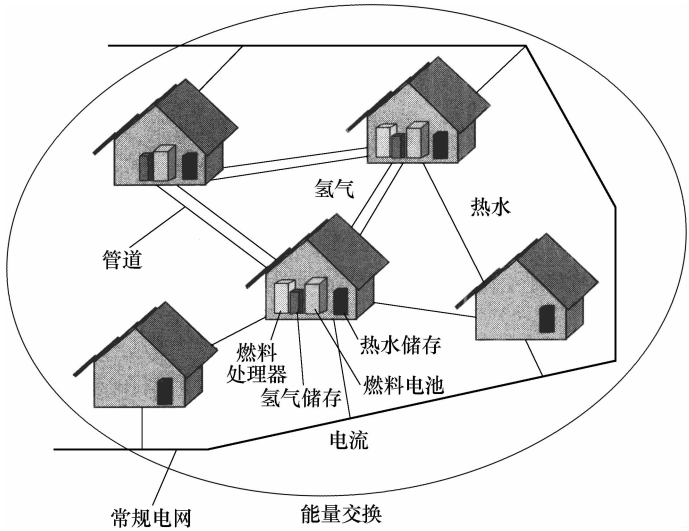


图 7-5 提议的居民能源网络

装了热水管道，三个家庭还安装了燃料电池堆。氢气通过房子之间的氢气管道可以互换。两个家庭还配备了燃料处理器，持续不断地在额定负载下运转，并同时有效地生产氢气。燃料电池堆根据这些家庭的负载而运行。

根据热电联产网络的结构，在文献 [3] 中提出并研究了四个操作方案规则：

1) 操作方案规则 0：每个燃料电池的电力调度是为了配合安装它的家庭的电力需求。家庭之间没有电力交换。

2) 操作方案规则 1：所有的燃料电池同样地分担家庭总电力需求。

3) 操作方案规则 2：与内燃发动机和部件控制类似的逻辑在这里也适用。燃料电池是随电力需求增加而一个一个地打开的，反之亦然。

4) 操作方案规则 3：与方案规则 2 类似，随电力需求增加，燃料电池一个一个地打开。然而，所有开启的燃料电池同样地分担总电力需求。在这个方案中，把方案规则 1 和规则 2 合并到了一起。

规则 0 是这个网络结构分析的基准情况。规则 1 是为了应对部分负载运作，它可以提供更高的发电效率，并且燃料电池比其他规则也可以操作更长的时间。因此，规则 1 提供高效率的电力，而不是热水。在规则 2 中，燃料电池有些在部分负载下运行，有些在额定负载下运行，它提供了最高的热回收效率。这个规则试图用最有效的方式从燃料电池获取热水（热）。规则 3 是介于规则 1 和 2 之间。

在文献 [3] 中可以找到这个热电联产概念的详细内容及模拟结果。

7.3 独立的应用

燃料电池电厂提供的电力，可能无法满足负载需求，特别是在负载高峰需求时或在固定电厂遇到瞬态事件时。在正常情况下，燃料电池需要与其他能源一起工作，以达到高负载需求能力。为这个目的一般选择用超级电容组，它可以提供爆发的能量，但它不能存储太大量的电能。Uzunoglu 和 Alam^[6] 提出了燃料电池堆和超级电容组的模型和控制方案。

7.3.1 燃料电池与超级电容组的动态模拟

7.3.1.1 燃料电池模拟

图 7-6 所示的是一个燃料电池动态模型^[6]。在这个模型中，考虑到了通过阀门的所有气体（氢气）的摩尔流量和在通道内的分压，与另外三个重要因素之间的关系。这三个因素是氢气入口流量、氢气出口流量和反应过程中的氢气流量。

假设温度和氧气浓度都恒定，燃料电池的输出电压可表达如下：

$$V_{\text{cell}} = E + \eta_{\text{act}} + \eta_{\text{ohmic}}$$

式中 $\eta_{\text{act}} = -B \ln(CI'_{\text{FC}})$

$$\eta_{\text{ohmic}} = -R^{\text{int}} I'_{\text{FC}}$$

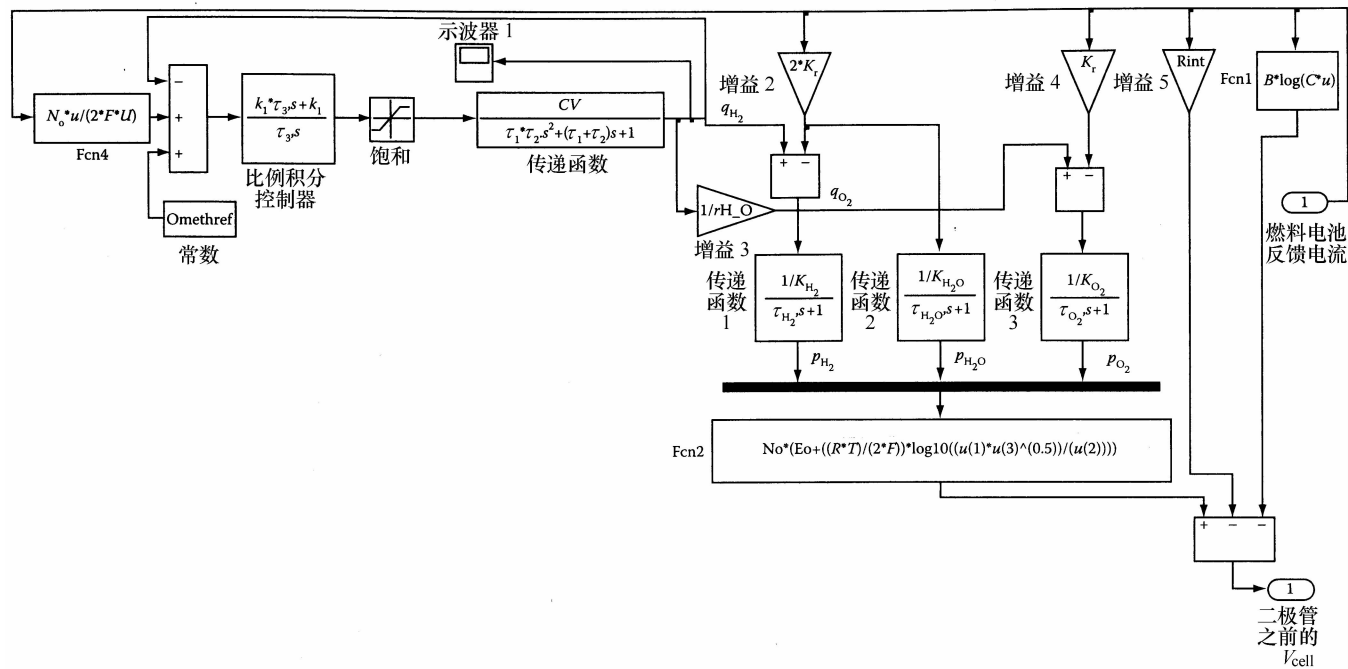


图 7-6 燃料电池系统的动态模型

并且

$$E = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \log \left[\frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right] \right]$$

在图 7-6 中我们可以看到，燃料电池的电压是这三个电压的总和。

7.3.1.2 超级电容组的模拟

图 7-7 所示为超级电容的经典等效模型。它由一个等效串联电阻（ESR）、一个等效并联电阻（EPR）和一个电容组成。由于单个超级电容的容量有限，我们需要把一组电容串联并联起来形成一个超级电容组。

7.3.2 燃料电池和超级电容组组合的控制设计

如图 7-8 所示，在这个结构中，燃料电池系统和超级电容组是通过一个功率二极管连接起来的。

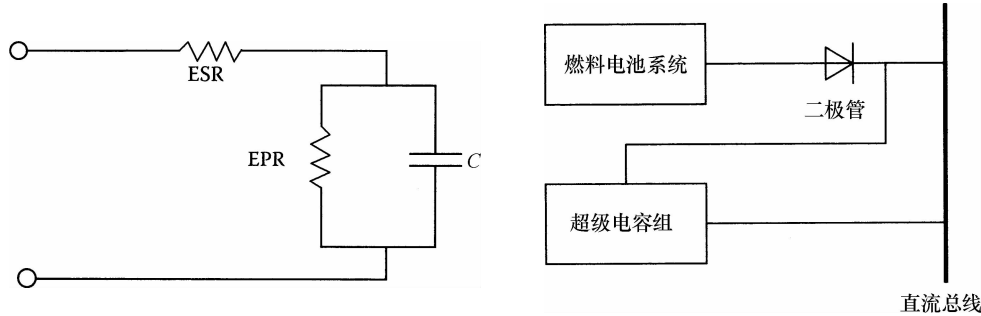


图 7-7 超级电容的经典等效模型

图 7-8 燃料电池和超级电容
组合系统的控制方案

燃料电池系统决定了超级电容组和负载的电压，使超级电容组的功率容量不能被充分利用。燃料电池系统和超级电容组之间的功率分享是由这两个系统之间的总电阻决定的。这个组合系统的主要控制方案可以概括如下^[6]：

- 1) 在低功率需求（<5kW）周期，燃料电池系统产生的电能满足负载需求，剩余的电能被用来给超级电容组充电。根据总的负载端电压需求，超级电容组会充电或放电。
- 2) 在高功率需求（≥5kW）周期，燃料电池系统按着额定功率发电，超级电容组会放电来满足不能由燃料电池系统提供的额外功率需求。
- 3) 燃料电池系统电力供应短时中断时，只能由超级电容组来补偿。
- 4) 设计超级电容组要避免充电过量或充电不足的情况。
- 5) 如果允许负载端电压降低到初始值的 50%，可以使用超级电容组大约 75% 的初始储存能量。

为了实现上述组合系统的控制系统，我们在仿真模型中使用了比例积分控制器、理想开关元件、电流和电压传感器。

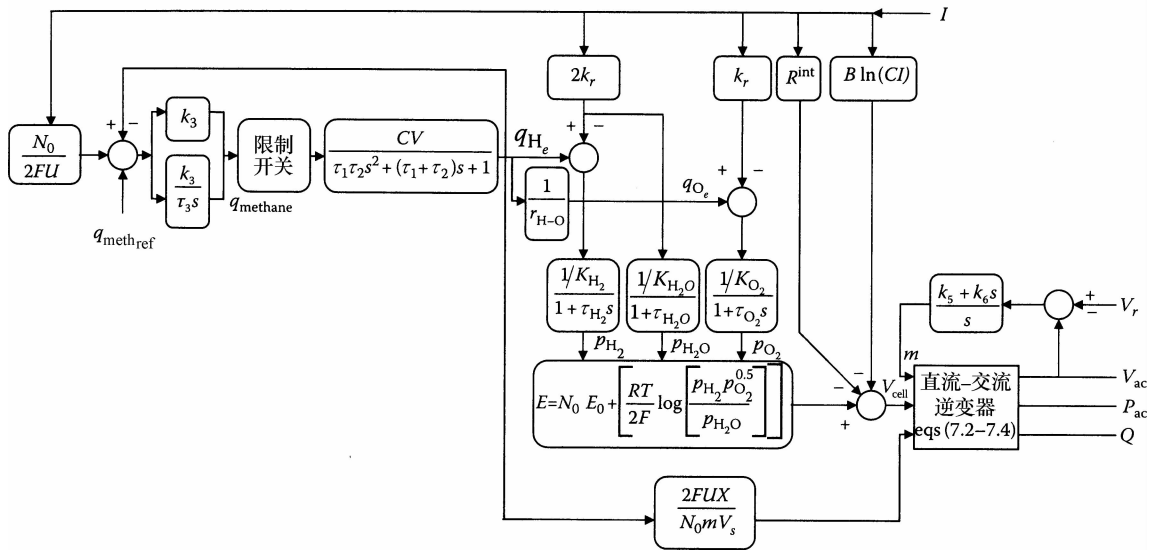


图 7-9 燃料电池系统的有功功率和无功功率控制

(出自 El-Sharkh, M. et al., *IEEE Trans. Power Syst.*, 19 (4), 2004. 许可使用)

7.3.3 独立燃料电池系统的主动和被动控制

根据电网中同步发电机的有功功率和无功功率,文献[7]提出了与有功功率和无功功率控制类似的一个模型。

假设有一个无损逆变器和一个小相位角 $\sin(\delta) \cong \delta$,应用输出电压、输出功率和电化学关系,我们可以得到输出电压的相位角 δ 与氢气流 q_{H_2} 之间的关系:

$$\delta = \frac{2FUX}{mV_s N_o} q_{H_2}$$

我们知道,同步发电机增加输入的蒸汽量可以提高涡轮机的输出功率,用这种方法可以控制同步发电机的输出功率。也可以用类似的方法来控制燃料电池系统的输出功率,唯一的区别是没有速度的变化,这会影响频率。

在燃料电池系统中,逆变器把频率固定在 60Hz。图 7-9 显示,我们可以分别根据甲烷参考信号和电流反馈信号来手动或自动控制氢气流量,电流反馈信号与终端负载成正比。我们加入一个限制开关来控制氢气量,这也是模拟实际燃料电池系统的开关设置。使用甲烷参考信号 q_{meth_ref} ,操作员可以手动设置燃料电池系统的输出功率到任何值,但要低于限制开关设置的最大值。

同步发电机控制无功功率是通过控制励磁电压来达到的,它控制发电机的输出电压和流入或流出发电机的无功功率。在燃料电池系统中,无功功率可以通过调制指数 m 来控制。调制指数控制端电压值,也控制从燃料电池系统输出的无功功率。使用参考电压信号 V_r 可以手动设置调制指数 m 。

参 考 文 献

1. C. Wang, M.H. Nehrir, and H. Gao, Control of PEM fuel cell distributed generation systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21, 586–595, 2006.
2. C. Wang, M.H. Nehrir, and S.R. Shaw, Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(2), 442–451, June 2005.
3. A. Hirohisa, Y. Shigeo, I. Yoshiro, K. Junji, M. Tetsuhiko, Y. Hiroshi, M. Akinobu, and I. Itaru, Operational strategies of networked fuel cells in residential homes, *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(3), 1405–1414, 2006.
4. Fuel cell project team, Senior Vice-Minister Meeting: Report of Fuel Cell Project Team, Japanese Government (in Japanese), 2002.
5. U.S. Department of Energy, DOE releases long-term Hydrogen Posture plan, *Fuel Cells Bulletin*, 2004 (5), May 2004.
6. M. Uzunoglu and M.S. Alam, Dynamic modeling, design, and simulation of a combined PEM fuel cell and ultracapacitor system for stand-alone residential applications, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(3), 767–775, 2006.
7. M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M.S. Alam, A.A. Sakla, P.C. Byrne, and T. Thomas, Analysis of active and reactive power control of a stand-alone PEM fuel cell power plant, *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(4), 2022–2028, 2004.

第 8 章 混合可再生能源系统的控制和分析

8.1 简介

燃料电池的容量和工作特性致使它通常要与其他替代能源（如风能和太阳能）一起工作。因此，我们需要考虑下面几个主要问题：系统结构设计、控制方法和功率调节系统设计。混合可再生能源发电系统（Hybrid Renewable Energy Power Systems, HREPSs）包括两种或更多种能量转换装置，或同一装置使用两种或更多种燃料。当混合能源系统结合在一起时，能克服单独使用其中任何一种能源的固有局限性。分布式能源的特点在于：①通常位于或接近使用地点；②当地价值；③配电电压^[1]。

混合可再生能源发电系统的优点是^[1]

- 增强的可靠性：与单独发电技术相比，混合发电系统结合热能、电能和高效率的设备（燃料电池、先进材料、冷却系统等等），可以提高整体效率，并节省能源。

- 低排放：混合可再生能源发电系统可以最大限度地利用可再生资源，得到比传统化石燃料技术更低排放的系统。

- 可接受的成本：混合可再生能源发电系统可以用可接受的最低成本来达到市场所需的关键性能，这是市场接受的关键。

不同的替代能源在一定程度上可以互补。与单一能源系统相比，多能源混合替代能源系统（用适当的控制）有很大的潜力来为客户提供更高质量和更可靠的电力。由于这一特性，混合能源发电系统的研究已经引起全世界的关注^[2-12]。

8.1.1 风能

风能作为一种机械动力源已经有几百年历史了。从 19 世纪 90 年代开始，风能成为一种电能来源。现在用风力发电比以往任何时候都重要。它是目前在美国可再生能源中增长最快的一种，在过去几年每年增长约 30%。

由于最近技术的进步，风能发电与化石燃料发电相比开始有经济上的竞争力，特别是在那些电力价格昂贵的地区^[13]。现在，更轻和更强的材料能捕获更多的风能，并增加机械部件的寿命。在风电转换中已经使用新一代电力和控制电子技术，包括绝缘栅双极晶体管和数字信号处理器。最新的绝缘栅双极晶体管比上一代有更快的开关时间和更高的额定功率；现代数字信号处理器比以前的数字信号控制器有

更强的计算能力和更快的速度；更快的开关和处理速度意味着更高品质电源有更少谐波失真；单一芯片有更高的额定功率和更强的计算能力，允许我们减少总的电子元件数，这意味着系统更小，更便宜。

技术进步并非是最近风电行业增长的唯一原因。今天，我们比几十年前更清楚意识到使用化石燃料的环境和政治问题。环境问题包括空气污染、全球变暖、臭氧洞等。虽然人们对待环境问题的立场广泛，但现在辩论的不是是否发生实际的损害，而是集中在损害的程度。没有人认真地相信，人类没有破坏我们的环境。我们将不可避免地要解决环境问题。风能显然比化石能源更环保。当用风能发电时，不会排放有害气体，也不消耗水。有一个并不广为人知的事实，就是化石燃料发电消耗美国国内使用的高达 39% 的淡水^[14,15]。在这个国家的干旱地区，如德克萨斯州西部，优化用水是可持续发展和人口密集城市/农业地区未来增长的关键。

除了以上风能相比化石燃料的环境优势，我们也有用风能发电的政治利益。风能既丰富又可再生。这样的能源是免费的，而且不需要保存。在我们境内的风能绰绰有余，足够满足我们未来很远时间的所有电力需求。随着电力和氢燃料汽车的不断发展和增长，我们可以减少为确保外国石油和天然气供应而花的时间、精力和金钱。这也是化石燃料隐性成本的一部分。如果能用国内现有资源生产国家所需能源的较大部分，我们就可以大大减少国际政治的相关问题。

8.1.2 混合能源

风的能量随风速的立方变化。从牛顿定律中，我们知道一个给定质量的动能正比于速度的平方。此外，增加风的速度也成正比地增加通过给定平面的风质量。结果是，风速加倍会使风能增加八倍。

然而，风能的主要缺点是它固有的变化性。风能的到来通常随时间而变化。只有当有风时，才可以收集风能，这使得它不适合作为主要能源。解决这一问题的传统方法，特别是在偏远的农村，是用柴油发电机来补充风力发电机。然而，风和柴油的组合并不能完全排除使用化石燃料相关的问题。

8.1.3 燃料电池能源

一个替代的补救方法是使用氢气燃料电池，它提供了风能所缺少的随时可用性，同时保留了很多优点。风力涡轮机可以高效率地收集风能，而燃料电池可以用氢气高效率地生产电能。此外，燃料电池在部分负载条件下仍能继续有效地运作，而柴油发电机在不足额定功率下运行时其效率会大幅度下降。

纯氢气是一种清洁、无污染的燃料。但是，应该指出的是，要成为一个真正的可再生能源，氢气的来源是重要的考虑因素。如果用可再生的风能或太阳能来驱动电解槽，那么氢气就是潜在的可再生能源。实际上，电解槽的水是这种系统唯一需要的燃料。此外，电解产生的氢气一般远比从碳氢化合物蒸气转换的氢气更纯。

单独使用燃料电池就可以提供可靠的清洁能源，但比风能的成本高很多。目

前，燃料电池每千瓦发电能力的成本通常比风力发电机组多 3 ~ 5 倍，而且需要燃料供应^[16]。一个集成的系统将以互补的方式来使用风能和燃料电池能，使我们有机会使用低成本稳定的可再生能源。要做到这一点，当风能超过负载需求时，我们要储存用电解槽产生的氢气。这种混合电力系统可以连接到公用电网上，通过分布式发电来增加可靠性和安全性。这样的系统还可以独立地为远离公用电网的地方提供所需的电能。

在这一章中，我们将介绍几个混合可再生能源发电系统的典型设计。

8.2 包括燃料电池和风能的混合系统

8.2.1 混合系统的仿真组件和方程

图 8-1 显示了最近一项研究中的风力涡轮机和燃料电池混合系统模型^[17]，表 8-1 包含了相关的系统参数和参数值。我们用 MATLAB®和 Simulink®软件模拟了这个系统。它类似于以前 Iqbal 在文献 [18] 中描述的系统，但是加了一些修改和更正。我们特别对文献 [18] 中的仿真模型做了以下改进：

- 用美国能源部模型取代了燃料电池堆方程^[19,20]，并且修改了美国能源部燃料电池控制器来调节电池堆电压而不是调节燃料的使用。
- 用直流-交流逆变器和交流负载模型取代了直流负载。
- 加入了一个风力涡轮机与燃料电池系统的互连（没有被 Iqbal 指定），包括滤波器电容和电感。
- 纠正了风力发电机模型数学推导中的错误。

表 8-1 风力涡轮机-燃料电池系统参数

参 数	参数值	参 数 描 述
R	3.25m	风力涡轮机转子半径
θ_p	2°	转子叶片固定间距
J_{eq}	85kg · m ²	传动系统转动惯量
B_{eq}	0.5N · m · s/rad	传动系统阻尼因子
N	14	变速比
R_a	2.639Ω	电枢电阻
L_a	34.6mH	电枢电感
R_f	335Ω	场绕组电阻
L_f	156H	场绕组电感
K_g	0.08912	发电机常数
K_f	56	场电路电压增益
N	220	燃料电池堆的电池数
A_C	136.7cm ²	电池有效面积
V_A	6.495cm ³	阳极体积
V_C	12.96cm ³	阴极体积
L_{fc}	25mH	系统互联电感
C	25mF	系统互连电容

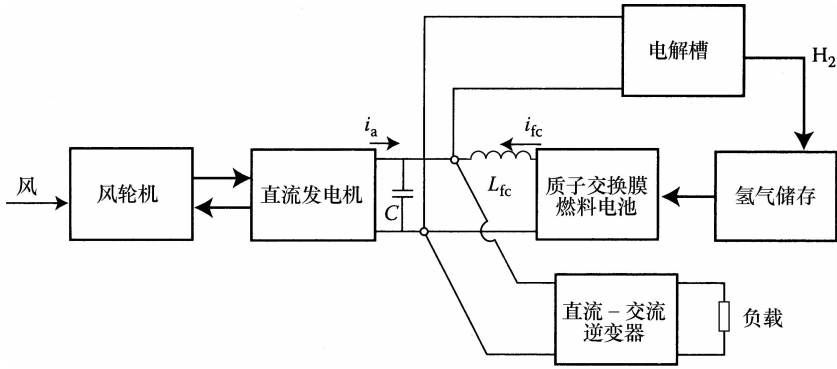


图 8-1 完整的混合风力-燃料电池系统

下面介绍每一个子系统及其控制方程。

8.2.1.1 风力涡轮机子系统

风能通过变速涡轮机和直流发电机转化为电能。用风速仪测量的点风速 u_i ，先转换成有效风速 u_e ，再用在风力涡轮机模型中来解释加在涡轮转子整个扫过区的力和转矩的变化。使用状态空间形式的空间滤波器，可以找到有效风速^[21]：

$$\begin{aligned} du_1/dt &= -0.6467u_iu_1 - 0.084335u_i^2u_2 + u_i \\ du_2/dt &= u_1 \end{aligned} \tag{8-1}$$

式中 u_1 和 u_2 是用于计算有效风速的状态变量：

$$u_e = 0.2242u_iu_1 + 0.084335u_i^2u_2 \tag{8-2}$$

功率系数 C_p 是从风能中得到的机械能与通过风力涡轮机的总能量的比值。一个给定尺寸的风力涡轮机的瞬时 C_p 取决于尖端速度比 λ ^[22]，后者是转子叶尖端速度与吹入风速的比。 λ 是确定风力涡轮机空气动力学性能的一个决定量。因此，尖端速度比给出如下

$$\lambda = \omega R / V_0 \tag{8-3}$$

式中 ω ——涡轮转速；
 R ——转子半径^[22]。

我们允许转子随风速变化而改变速度， λ 可以保持不变，这意味着 C_p 也保持不变，这是为最多捕获能量的一个重要因素。由于损耗，实际风力涡轮机 C_p 的典型最大值是 0.4。

我们可以找到相应的转矩系数 C_q

$$C_q = C_p / \lambda \tag{8-4}$$

我们定义转子上感应的空气动力转矩 T_w

$$T_w = (1/2)\rho\pi R^3 u_e^2 C_q(\lambda) \cos^2(\theta) \quad (8-5)$$

式中 C_q 是 λ 的函数。在式 8-5 中, θ 指的是风速和涡轮轴的偏航失准角。在文献 [17] 中, 假设偏航失准角是零。根据风力涡轮机制造商的数据, 我们可以用下面的公式来确定转矩系数 C_q

$$C_q(\lambda) = -0.0281 + 0.0385\lambda - 0.0046\lambda^2 + 0.000148\lambda^3 \quad (8-6)$$

C_q 的最大值对应于约 5.8 的尖端速度比。因为是非稳定空气动力, 要修正转矩的计算, 我们用状态空间形式的铅滞滤波器, 从空气动力转矩 T_w 计算转子轴预期的转矩 $T_{we}^{[21]}$:

$$\begin{aligned} dT_l/dt &= -0.0793u_e T_l + T_w \\ T_{we} &= -0.0293u_e T_l + 1.37T_w \end{aligned} \quad (8-7)$$

最后, 在风力涡轮机侧, 描述完整传动系统转矩平衡的方程是

$$J_{eq}(d\omega/dt) + B_{eq}\omega = T_{we} - NT_e \quad (8-8)$$

式中 J_{eq} ——动力传动系统的等效转动惯量;

B_{eq} ——等效摩擦阻尼系数;

T_e ——发电机转矩乘以变速箱比 N (变速箱用来加快发电机的轴转速)。

我们输入到模型中的是恒定风速、阶变风速或变化风速的曲线。我们用 SNwind 1.0 程序模拟变速风, 这个程序原先是由桑迪亚国家实验室 (Sandia National Lab) 开发的, 然后由国家再生能源实验室修改的。对于一个特定的气象状况, 这个 SNwind 程序能产生三维全场湍流风数据。我们需要用一个输入参数文件给出 SNwind 仿真要得到的条件。这些参数包括湍流强度、湍流谱模型、在一个参考高度的平均风速以及涡轮转子中心的高度。

8.2.1.2 直流发电机子系统

我们假设使用有单独激发场路的 5kW 直流发电机, 把风力涡轮机的机械能转换成电能。电枢电路通过换向器和单向电流刷连接到外部负载。直流发电机可以在很大的工作范围内提供良好的速度和转矩管理, 而且比交流发电机更容易实施变速操作。

场路是与电枢电路无关的串联电阻-电感电路。描述场路的微分方程是

$$di_f/dt = (1/L_f)(K_f V_{fi} - R_f i_f) \quad (8-9)$$

式中 i_f ——场电流;

R_f ——场绕组电阻;

L_f ——场电感;

V_{fi} ——场控制器的输入电压, 用它乘以增益值 K_f 能得到实际加到场电路的电压 V_f 。

$$V_f = K_f V_{fi} \quad (8-10)$$

我们把转子上的电枢电路模拟成有电压的一个电感和一个电阻串联。电枢电压

E_a 也被称为空气间隙电压，与场绕组电流的关系公式是

$$E_a = K_g \omega_m (206.7 i_f^3 - 760.75 i_f^2 + 982.3 i_f + 5.26) \tag{8-11}$$

式 (8-11) 是用制造商提供的发电机饱和特性来推导的： K_g 是一个常量，取决于发电机转子结构的尺寸、转子转动数以及其他细节； ω_m 是发电机的转子速度，因为变速箱比，它比风涡轮转子转速 ω 快 N 倍。描述电枢电路的微分方程是

$$di_a/dt = (1/L_a) [E_a - i_a (R_L + R_a)] \tag{8-12}$$

式中 i_a ——电枢电流；

R_a ——电枢电阻；

L_a ——电枢电感。

式 8-12 与场路方程式 (8-9) 相似。然而，在电枢电路中，等效负载电阻 R_L 是加到电枢电阻 R_a 上的。电磁转矩是用电枢电路的电功率（电压 E_a 乘以电枢电流 i_a ）除以发电机转子速度得到的

$$T_e = E_a i_a / \omega_m \tag{8-13}$$

8.2.1.3 风力涡轮机和直流发电机控制器

在风力—燃料电池系统模型中^[17]，发电机控制器是用后差分法推导的离散时间比例积分微分控制器。后差分法基于 Euler 法，是无条件稳定的^[23]。控制器的一般传递函数是^[24]：

$$G(z) = (q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}) / (1 - z^{-1}) \tag{8-14}$$

在模拟中所使用的控制器形式是

$$y(k) = y(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \tag{8-15}$$

式中 $e(k)$ ——误差信号（控制器的输入）；

$y(k)$ ——控制器的输出信号。

q 项是从比例积分微分常数得到的：

$$\begin{aligned} q_0 &= K_p [1 + (T_d/T_s)] \\ q_1 &= K_p [(T_s/T_i) - 2(T_d/T_s) - 1] \\ q_2 &= K_p (T_d/T_s) \end{aligned} \tag{8-16}$$

式中 K_p ， T_i 和 T_d 分别是比例、积分和微分常数。控制器采样时间是 T_s 。我们保留了 Iqbal 用的控制器的原来形式，只调整了增益。所有的比例、积分、微分控制参数列于表 8-2 中。

表 8-2 离散和连续时间比例积分微分控制器参数

参 数	参 数 值	参 数 说 明
K_p	0.003	Omega-控制比例常数
T_i	5	Omega-控制积分常数
T_d	1	Omega-控制微分常数
T_s	0.25	Omega-采样周期

(续)

参 数	参 数 值	参 数 说 明
K_{plm}	2.5×10^{-4}	Lambda-控制比例常数
T_{ilm}	0.08	Lambda-控制积分常数
T_{dlm}	0	Lambda-控制微分常数
T_{slm}	0.25	Lambda-采样周期
K_{pfc}	4	燃料流量-控制比例常数
K_{ifc}	1	燃料流量-控制积分常数
K_{dfc}	1	燃料流量-控制微分常数

在低于额定风速条件下，风力涡轮机是在变速模式下运作。lambda-控制器通过调整加在发电机上的场电压来维持恒定尖端速度比 $\lambda = 6.5$ 。使用 $\lambda = 6.5$ 而不是 5.8 的最优值是为了方便。因为适当调节 lambda 值会使转子速度（单位 rad/s）是风速的两倍（单位 rad/s）。在高于额定风速 $u_e = 8\text{m/s}$ 的条件下，omega-控制器把风力涡轮机转子速度调节到恒定值 $\omega = 16\text{rad/s}$ 。控制再一次是通过调节发电机场电压来实现的。

8.2.1.4 质子交换膜燃料电池子系统

这里的描述是为了完整性。文献 [17] 中的质子交换膜燃料电池模型开始于 Nernst 方程定义的理想势能，这是 Larminie 和 Dicks 在文献 [25] 中介绍的。理想势能把反应物和产物浓度与在平衡条件下电化学反应产生的电位差联系起来。然后我们用美国能源部 2001 年未来能源挑战学生设计竞赛的燃料电池模型^[19,20]来构造电池的电压方程

$$V = N \left[OCV + \frac{RF}{2F} \ln \left(\frac{PH_2 (PO_2/P_{std})^{1/2}}{PH_2O} \right) - L \right]$$

(8-17)

这是我们在前面第 3 章介绍的。
燃料电池的实际电压可以用以上定义的理想势能^[25]减去不可逆损失 L 来推导。这些不可逆损失主要有四类：激活损失、欧姆损失、浓度损失和内部电流损失。像第 3 章讨论的，电压损失 L 可以描述为

$$L = (i + i_n) r + a \ln \left(\frac{i + i_n}{i_o} \right) - b \ln \left(1 - \frac{i + i_n}{i_l} \right)$$

(8-18)

我们定义氢气、氧气和水的分压为三个系统状态变量。此外，由于水管理影响燃料电池的性能，我们在阳极和阴极两侧使用加湿器来控制电池内的湿度。考虑阴极侧的水比考虑阳极侧的水更为复杂，因为它不仅包括加湿器提供的水，而且包括反应副产物的水。

图 8-2 演示了这些气体是如何流入和流出电池的。

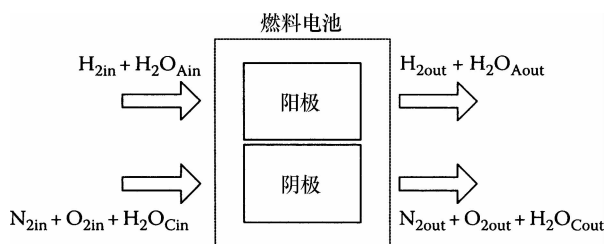


图 8-2 质子交换膜燃料电池的气体流动示意图

根据理想气体定律 $PV = nRT$ ，每种气体的分压与电池内的气体量成正比，后者等于入口气流量减去耗气量和出口气流量。因此，状态方程是

$$\frac{dPH_2}{dt} = \frac{RT}{V_A} (H_{2in} - H_{2used} - H_{2out})$$

$$\frac{dPO_2}{dt} = \frac{RT}{V_C} (O_{2in} - O_{2used} - O_{2out})$$

$$\frac{dPH_2O_C}{dt} = \frac{RT}{V_C} (H_2O_{Cin} + H_2O_{Cproduced} - H_2O_{Cout}) \quad (8-19)$$

式中 H_{2in} 、 O_{2in} 和 H_2O_{Cin} ——阴极侧入口氢气、氧气和水的流率；

H_{2out} 、 O_{2out} 和 H_2O_{Cout} ——氢气、氧气和水的出口流率；

H_{2used} 、 O_{2used} 和 $H_2O_{Cproduced}$ ——氢气、氧气和水的的使用率和产生率，它们与输出电流 I 的关系是

$$H_{2used} = 2O_{2used} = H_2O_{Cproduced} = 2K_r I = 2K_r A_c i \quad (8-20)$$

式中 $K_r = N/4F$ (mol/C)；

A_c ——电池有效面积 (cm²)；

i ——电流密度 (A/cm²)。

由于入口流率和输出电流是可测量的，出口流率可以由以下方程定义：

$$H_{2out} = (Anode_{in} - 2K_r A_c i) FH_2$$

$$O_{2out} = (Cathode_{in} - K_r A_c i) FO_2$$

$$H_2O_{Cout} = (Cathode_{in} + 2K_r A_c i) FH_2O_C \quad (8-21)$$

式中， $Anode_{in}$ 和 $Cathode_{in}$ 分别是图 8-2 所定义的阳极入口流率总和及阴极入口流率总和。 FH_2 、 FO_2 和 FH_2O_C 分别是燃料电池内每种气体的压力分数。

在美国能源部模型中

$$FH_2 = \frac{PH_2}{P_{OP}}$$

$$FO_2 = \frac{PO_2}{P_{OP}}$$

$$FH_2O_c = \frac{PH_2O_c}{P_{op}} \quad (8-22)$$

其中假设电池的压力保持在恒定值 P_{op} ，也就是稳态工作压力 101kPa。

8.2.1.5 燃料电池控制器

我们用连续的比例、积分、微分控制器在燃料电池的入口调节氢燃料流率，来控制燃料电池堆电压。这个控制器的传递函数是

$$G(s) = K_{pfc} + (K_{ifc}/s) + sK_{dfc} \quad (8-23)$$

控制器的参数值列于表 8-2。

在文献 [17] 中的模拟中，空气流率被固定到一个绰绰有余的值，来配合氢气流率，以满足燃料电池的电流需要。燃料流率控制器的目的是在电池堆被激活来补充风力发电时，调节逆变器输入电压到一个稳态值 200V。如果电压下降至低于这个值，控制器就会增加氢气流率来补偿。如果电压上升至超过这个值（当风力发电足够供给负载时），控制器会减小流率信号，燃料电池电流下降到零。

8.2.1.6 电解槽子系统

当可用风力发电不足以供给负载时，燃料电池会转换储存的氢气来提供额外的电能；如果风力发电足够供给负载，则燃料电池不再工作，多余的风能被送到电解槽来增加氢气储存。

单极 Stuart 电解槽的工作由以下公式控制：

$$X_{H_2} = 5.18e^{-6}i_{elec} \quad (8-24)$$

式中 X_{H_2} ——氢气流率 (mol/s)；

i_{elec} ——通过电解槽的电流^[26]，它等效于 0.0128mol/s · A。

8.2.1.7 等效负载和系统互联

在文献 [17] 中介绍的混合风力-燃料电池系统中，等效负载与一个滤波电容器并联。这里使用一个串联的电感 L_{fc} ，是考虑到直流发电机和燃料电池互联在瞬态时有电压差。每个子系统的电流合并后流到负载。电容和电感是理想组件，不消耗任何功率。图 8-3 所示是这个互联的细节。

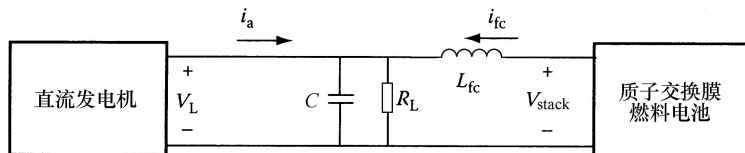


图 8-3 有互联电容和电感的等效负载电阻

式 (8-25) 表明如何计算从燃料电池中通过电感吸取的电流：

$$i_{fc} = (1/L_{fc}) \int (V_{stack} - V_L) dt + i_{fc}(0) \quad (8-25)$$

式中 V_{stack} ——电池堆电压；
 $i_{fc}(0)$ ——电感的初始电流；
 V_L ——负载电压即直流发电机电压，可以通过以下方程计算：
$$V_L = (1/C) \int \{ i_a + i_{fc} - (V_L/R_L) \} dt + V_L(0) \quad (8-26)$$
 i_a ——发电机电枢电流；
 $V_L(0)$ ——电容的初始电压；
 R_L ——等效负载电阻，代表直流-交流逆变器和交流负载^[27]。

8.2.2 模拟结果

我们对文献 [17] 中的风力-燃料电池系统模型进行了仿真运行，使用高于和低于额定风速（8m/s）的条件，也使用了负载大于或小于可用风能发电的条件。这些模拟运行的不同工作条件，对应于风速和等效负载电阻的阶跃变化和更实际的风速曲线。

8.2.2.1 低于额定风速（风能 > 负载）

当可用风能大于负载时，燃料电池不发电。在这种情况下，假设系统是在 6m/s 的风速下运行，等效负载电阻 R_L 是 30Ω 。图 8-4 所示为输入风速从 6 到 8m/s 阶跃变化（在第 10s 时），转子速度和逆变器输入电压的响应。在这两个风速下，lambda-控制器把转子速度分别调节到 12rad/s 和 16rad/s。

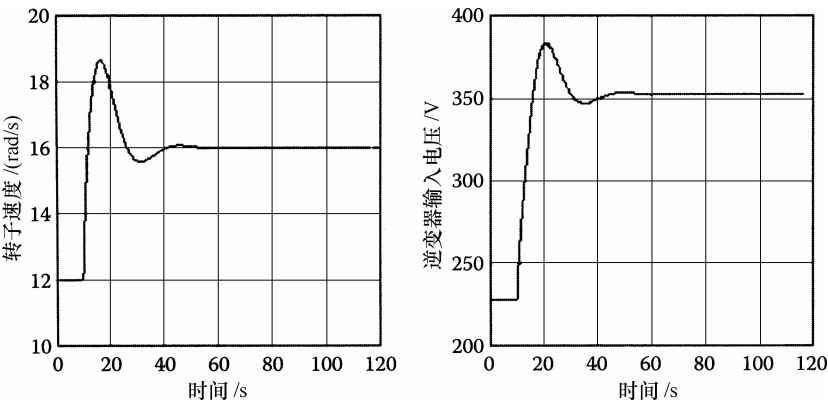


图 8-4 风速阶跃变化（低于额定风速）时的系统响应
（只是风轮发电机发电）

图 8-5 所示为在 8m/s 风速下，当负载电阻 R_L 从 30Ω 阶跃变化到 20Ω 时，转子速度和逆变器输入电压的响应。这个负载电阻变化模拟需求的变化或模拟增加电解槽收集“过剩”的可用电能。再次提醒注意，lambda-控制器把转速有效地调节至 16rad/s。

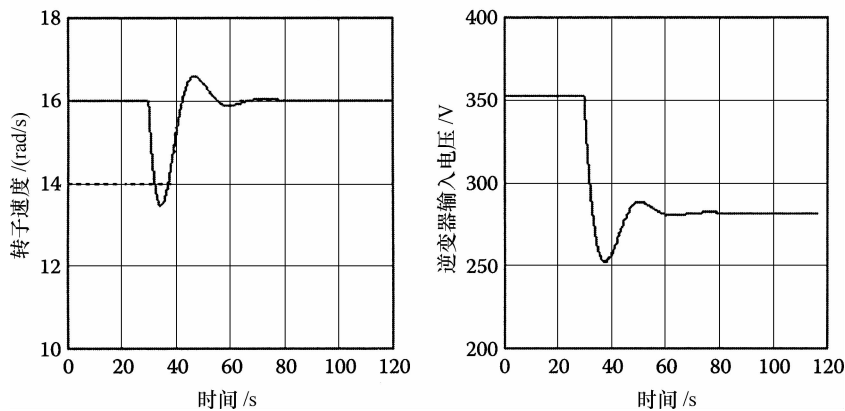


图 8-5 负载电阻阶跃变化时的系统响应
(只是风轮发电机发电)

8.2.2.2 高于额定风速 (风能 > 负载)

在这种情况下，燃料电池也不发电， R_L 是 20Ω 。假设系统是在 8m/s 风速下运作。图 8-6 显示了当风速从 8 到 10m/s 阶跃变化 (在第 30s) 时，转速和逆变器输入电压的响应。注意当输入风速超过额定值时， ω -控制器把现在的转速调节到 16rad/s 。

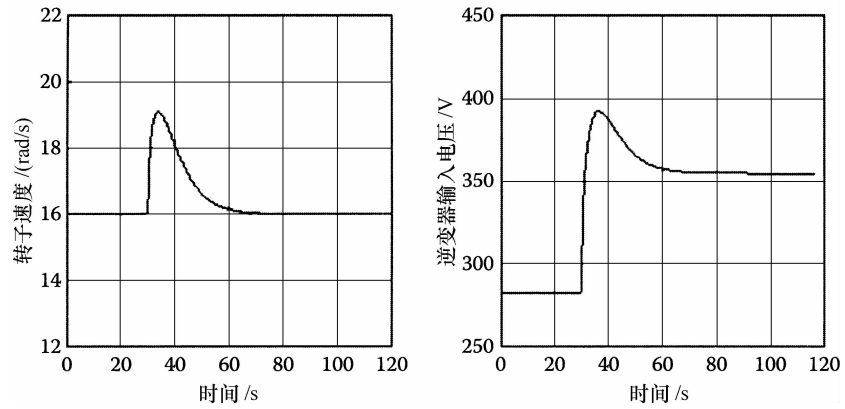


图 8-6 风速阶跃变化 (高于额定风速) 时的系统响应
(只是风轮发电机发电)

图 8-7 所示为当等效负载电阻从 20Ω 到 15Ω 阶跃变化时，转速和逆变器输入电压的响应。再次注意： ω -控制器有效地把转速调节到 16rad/s 。

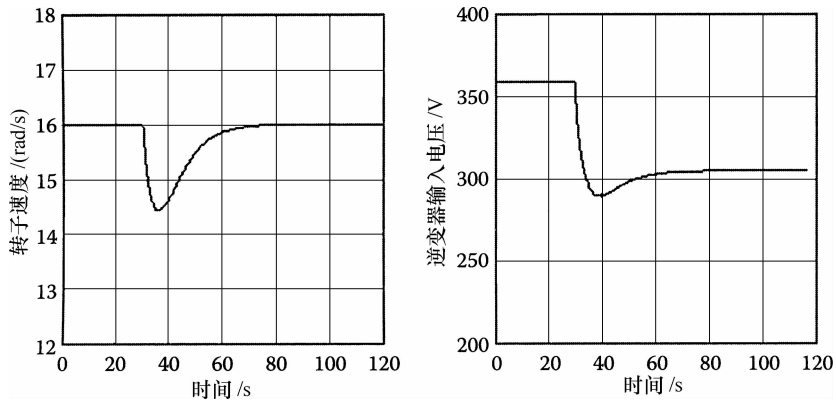


图 8-7 负载电阻阶跃变化时的系统响应（只是风轮发电机发电）

8.2.2.3 低于额定风速（风能 < 负载）

在这种情况下，风力发电不满足负载需求，燃料电池要产生所需的额外电能，以确保最低逆变器输入电压。假设混合系统在 6m/s 风速下运作，等效负载电阻是 15Ω 。图 8-8 显示了当风速从 6m/s 到 5m/s 阶跃变化（在第 10s）时，转子转速、

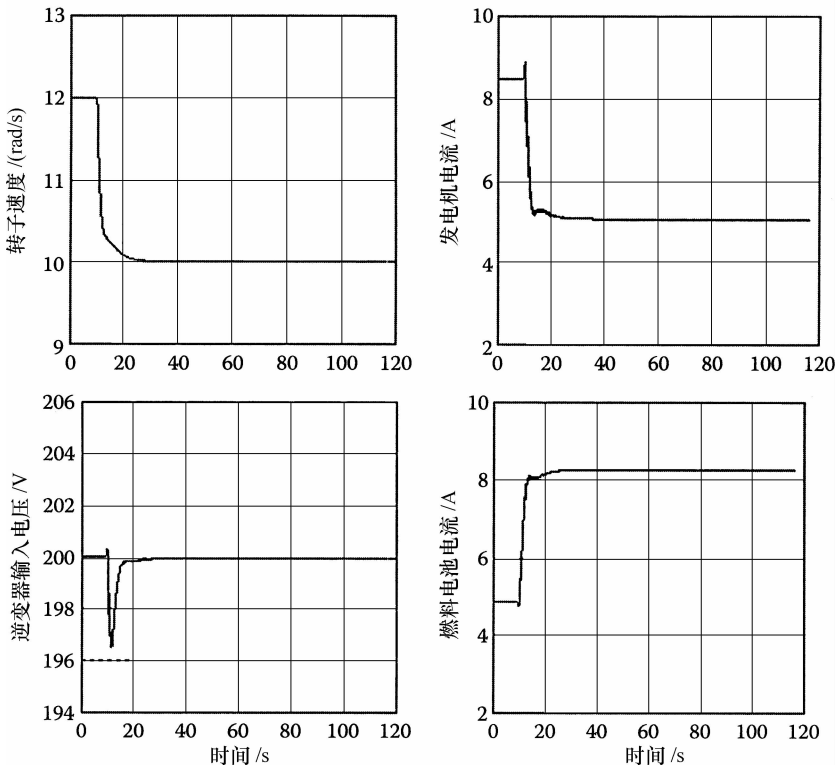


图 8-8 随着风速阶跃变化的系统响应（混合系统发电）

逆变器输入电压、发电机电流和燃料电池电流的响应。请注意在这两个风速下，lambda-控制器把转子速度分别调节到 12rad/s 和 10rad/s。逆变器输入电压被调节到负尖峰最大 1.8%。我们期望把电压偏差控制在 $\pm 3\%$ ，但这不是必须的；逆变器会进一步调节实际传到负载的输出。为了使逆变器有效运作，产生公用电力质量的 $115V_{rms}$ （rms = 方均根）输出，它的最低电压是 200V。

图 8-9 显示了当负载 R_L 从 15Ω 到 20Ω 阶跃变化时，转速、逆变器输入电压、发电机电流和燃料电池电流的响应。需求下降导致燃料电池电流减小。再次注意：当燃料电池电流降低时，燃料电池控制器把逆变器输入电压调节到 200V，正尖峰最大是 3.8%，负尖峰最大是 3.6%。

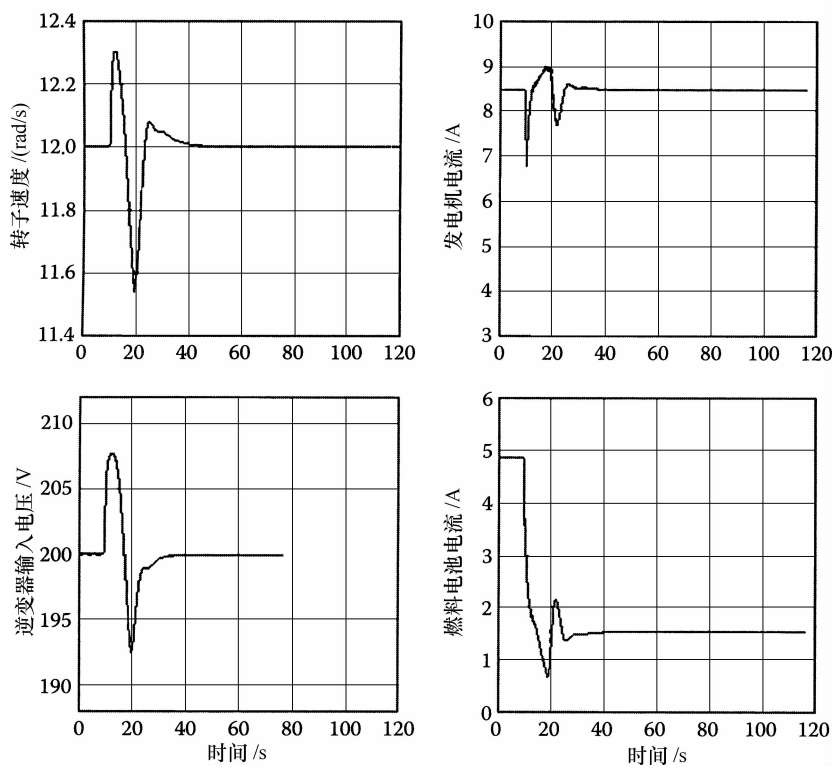


图 8-9 随负载电阻阶跃变化的系统响应（混合系统）

8.2.2.4 湍流风低于额定风速（风能 < 负载）

在这种情况下，风速是由 SNwind 软件产生的曲线来模拟的。平均风速设置为 5m/s，湍流特性是由 SNwind 输入文件参数确定的。实际产生的平均风速是

4. 705m/s。图 8-10 显示了在初始等效负载电阻 15Ω 下，转子转速、逆变器输入电压、发电机电流和燃料电池电流的响应。由于燃料电池是工作的，燃料电池控制器试图把逆变器输入电压调节到 200V。 λ -控制器在不断变化的风速下，努力维持平均转速在 9.41rad/s。

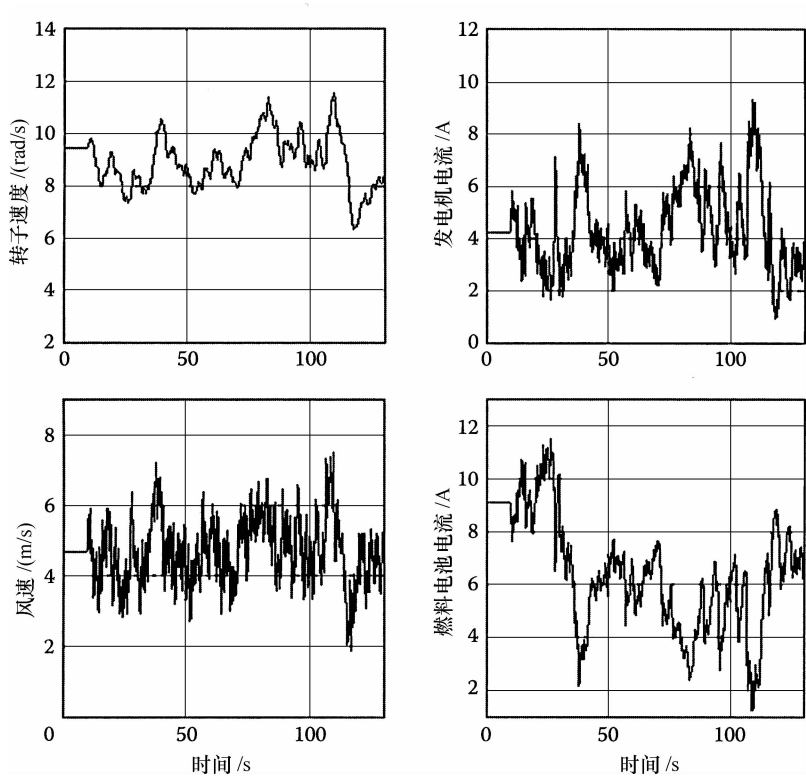


图 8-10 随着风速曲线变化的系统响应（混合系统）

在图 8-10 中，我们也可以看到发电机和燃料电池电流是互补的。随着风速减小，发电机电流减小，燃料电池电流相应增加。图 8-11 所示是发电机与燃料电池电流的总和值随着风速曲线的变化。随着电压被调节到 200V，初始平均电流的和是 13.33A，系统尝试为负载提供 2.67kW 的恒定功率。

然后在第 30s， R_L 值从 15Ω 到 20Ω 有 33% 的阶跃变化。燃料电池控制器再次把逆变器输入电压调节到 200V。正尖峰最大是 4.5%，负尖峰最大是 5%。在变化的风速条件下， λ -控制器努力维持 9.41rad/s 平均转速，这对应着的 λ 的预期值是 6.5rad/s。

图 8-10 还显示, 当等效负载电阻值阶跃变化后, 发电机电流维持在一个约 4.25A 的平均值, 而燃料电池电流从约 9.08A 降低到 5.75A。如图 8-11 所示, 随着逆变器输入电压被调节到 200V, 同时平均电流总和 (燃料电池电流加上发电机电流) 从 13.33A 阶跃变化到 10A, 输出到负载的功率从 2.67kW 变到 2kW。

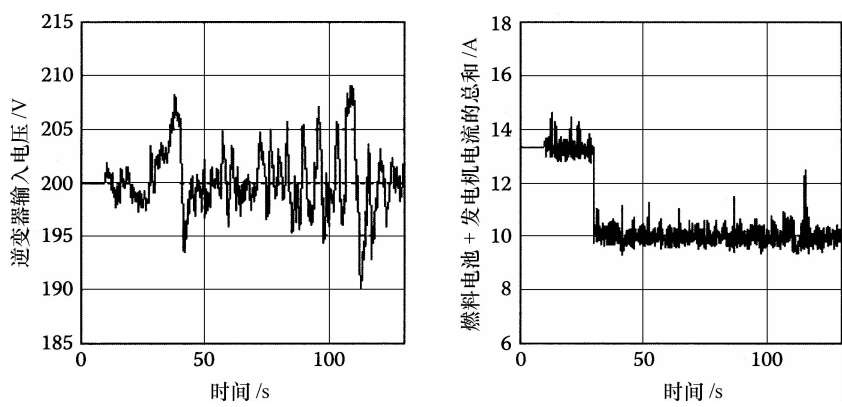


图 8-11 逆变器输入电压和燃料电池 + 发电机电流总和的响应(混合系统)

8.2.3 结论

风能是一种日益重要的可再生能源, 它可以用来解决美国和全球的空气污染、电网可靠性、对外国石油依赖和气候变化等问题。然而, 风能量随着时间变化, 而且在主要负载中心附近又比较少 (平均说), 这是建立仅靠风力的发电设施在技术和经济上的两个挑战。然而, 混合发电系统, 如风力涡轮机-燃料电池系统, 有可能会纠正这些缺点, 而且也使美国全国发电脱离中心化。这样可以缓解输电和配电系统中的瓶颈, 同时增加总的可靠性和安全性, 却不牺牲提供给客户的电能质量。此外, 风力涡轮机-燃料电池系统能用对环境友好的方式来实现这些结果, 却不产生有害气体排放。

在 Carter 和 Diong 的研究中^[17], 介绍了如何为小规模风力涡轮机-燃料电池系统样机开发一个仿真模型和相应的控制方案, 使进一步研究并优化这样的混合发电系统的性能、尺寸和成本等成为可能。在这项研究中, 他们把变速风力涡轮机和直流发电机、质子交换膜燃料电池及电解槽模型结合起来, 来模拟一个可再生混合风力-燃料电池交流发电系统。然后他们运行了有适当控制器的系统模型, 发现它可以在低于和高于额定 8m/s 风速下有效地工作, 把电能提供给交流负载和/或电解槽, 同时把逆变器所需的最小输入直流电压调节到 200V。这个模型的仿真结果表明了, 在风速和负载需求有重要变化 (包括阶跃和紊流) 时的各种具有代表性的情况下, 这个系统都能充分响应。

仿真结果还表明，这种混合发电系统可以靠混合的能源有效地提供公用电力级的电能。这些结果是令人鼓舞的。因为可再生混合风力发电机组-燃料电池系统可以用来解决美国和世界电力行业目前面临的挑战，如空气污染、电网的可靠性、对外国石油的依赖和气候变化。

8.3 混合可再生发电系统在孤岛上的应用

风涡轮机的输出功率在很多时候都波动，影响系统的频率。Senjyu 等人^[28]试图用混合可再生发电系统来解决这个问题。图 8-12 所示的是它的系统配置。

图中 P_s 是供给负载的功率， P_g 是柴油发电功率， P_{fc} 是燃料电池的实际发电功率， P_w 是风涡轮机的输出功率， P_r 是流到水电解槽的功率。

这个系统包括风力发电机、柴油发电机、燃料电池发电机和水电解槽。水电解槽用于吸收风力发电机快速波动的输出功率，来产生燃料电池所需的氢气燃料。供给负载的功率是 P_s 。

8.3.1 仿真模型

为了模拟如图 8-12 所示系统的配置，我们用图 8-13 所示的仿真模型来测试它。应该指出的是，风能是作为负载输入功率被模拟的。文献 [28] 并没有介绍风涡轮机的详细模型和控制方法。

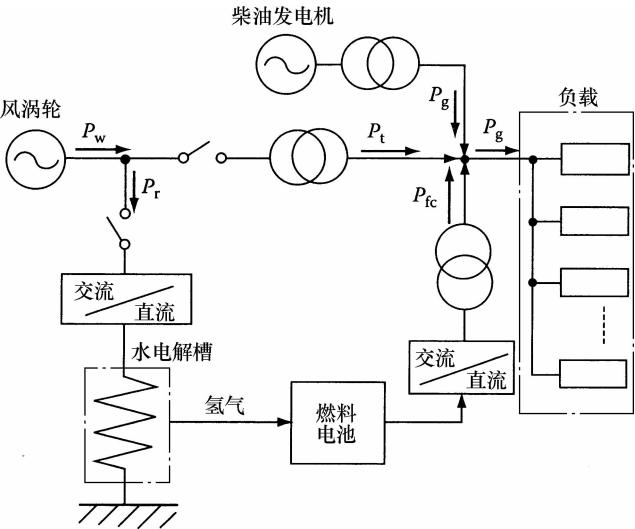


图 8-12 系统配置

8.3.2 控制方法

从图 8-13 可以看到，我们把比例积分控制器用在燃料电池、电解槽和柴油发电机上，如图 8-14 到图 8-16 所示。

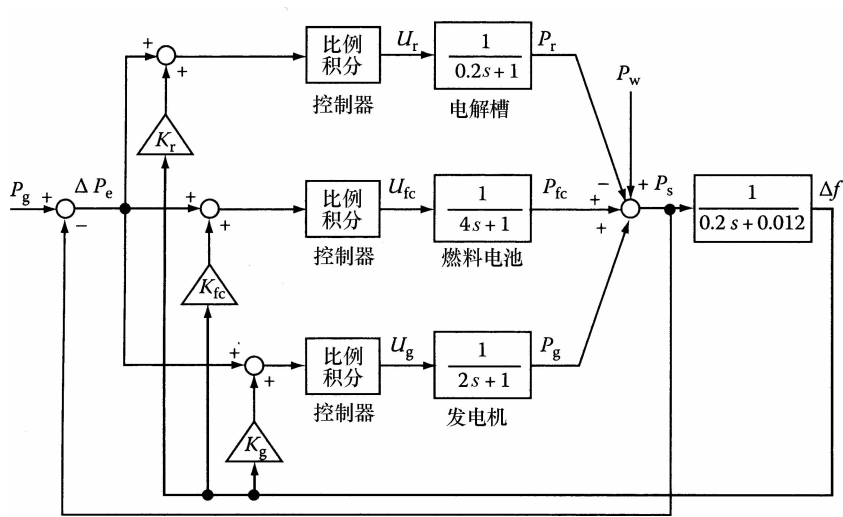


图 8-13 仿真模型

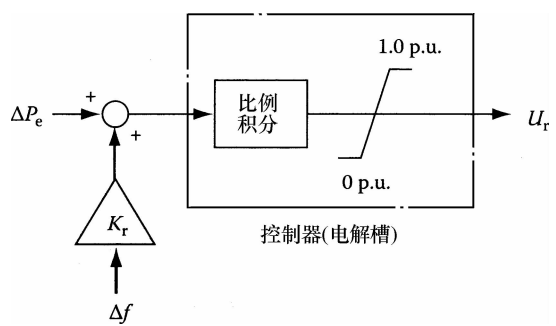


图 8-14 电解槽的比例积分控制器

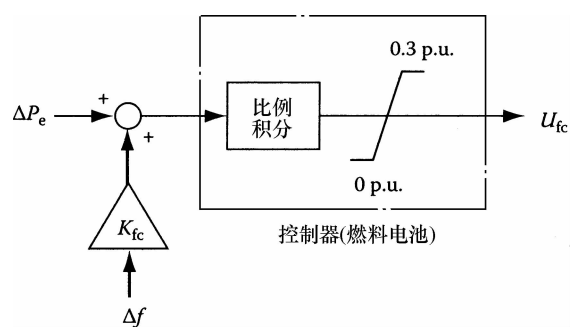


图 8-15 燃料电池的比例积分控制器

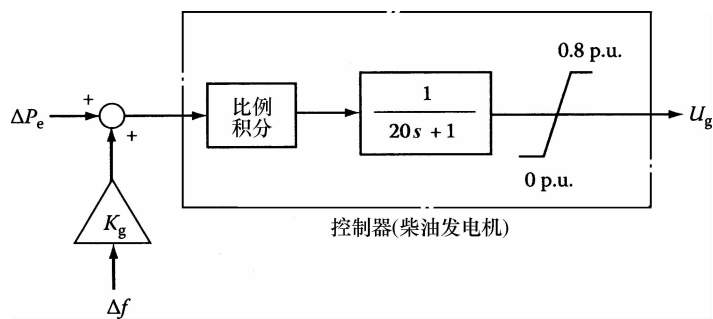


图 8-16 柴油发电机的比例积分控制器

8.3.3 模拟结果

在这个模拟研究中，我们模拟了表 8-3 所列的 4 种情况。表 8-4 是每种情况比例积分控制器的增益。这些参数是用尝试法确定的，使电力系统供应误差和频率偏差很小。在情况 1 中，系统只包括柴油发电机和风力涡轮机；在情况 2 中，系统包括柴油发电机、燃料电池发电机、风力涡轮机和水电解槽，这是文献 [28] 中提出的系统。在情况 3 中，系统使用情况 2 相同的设备。情况 4 的系统包括柴油发电机、风力涡轮机和电池。在情况 4 中，供电表示如下：

$$P_s = P_w + P_g + P_b \tag{8-27}$$

式中 P_b 是电池充电和放电功率。

表 8-3 4 种模拟情况

	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
柴油发电机	○	○	○	○
燃料电池	×	○	○	×
水电解槽	×	○	○	×
电池	×	×	×	○
风力涡轮机	○	○	△	○

注：○，意味着在最左侧列中的相应组件包括在情况中；
×，意味着在最左侧列中的相应的组件没有包括在情况中；
△，意味着情况 3 使用情况 2 相同的设备，但风力涡轮机发的所有电用于电解水。

表 8-4 比例积分控制器的增益值

情 况	设 备	比 例 增 益	积 分 增 益
情况 1	柴油	4.7	1.3
	风力	4.7	2.5
情况 2	燃料电池	11.5	3.7
	电解槽	16.8	5.8
情况 3	柴油	8.7	5.7
	燃料电池	5.5	2.3
情况 4	电池	4.7	2.3
	柴油	1.4	0.4

图 8-17 到 8-21 分别给出了情况 1、情况 2、情况 3、情况 4-1 和情况 4-2 的模拟结果。

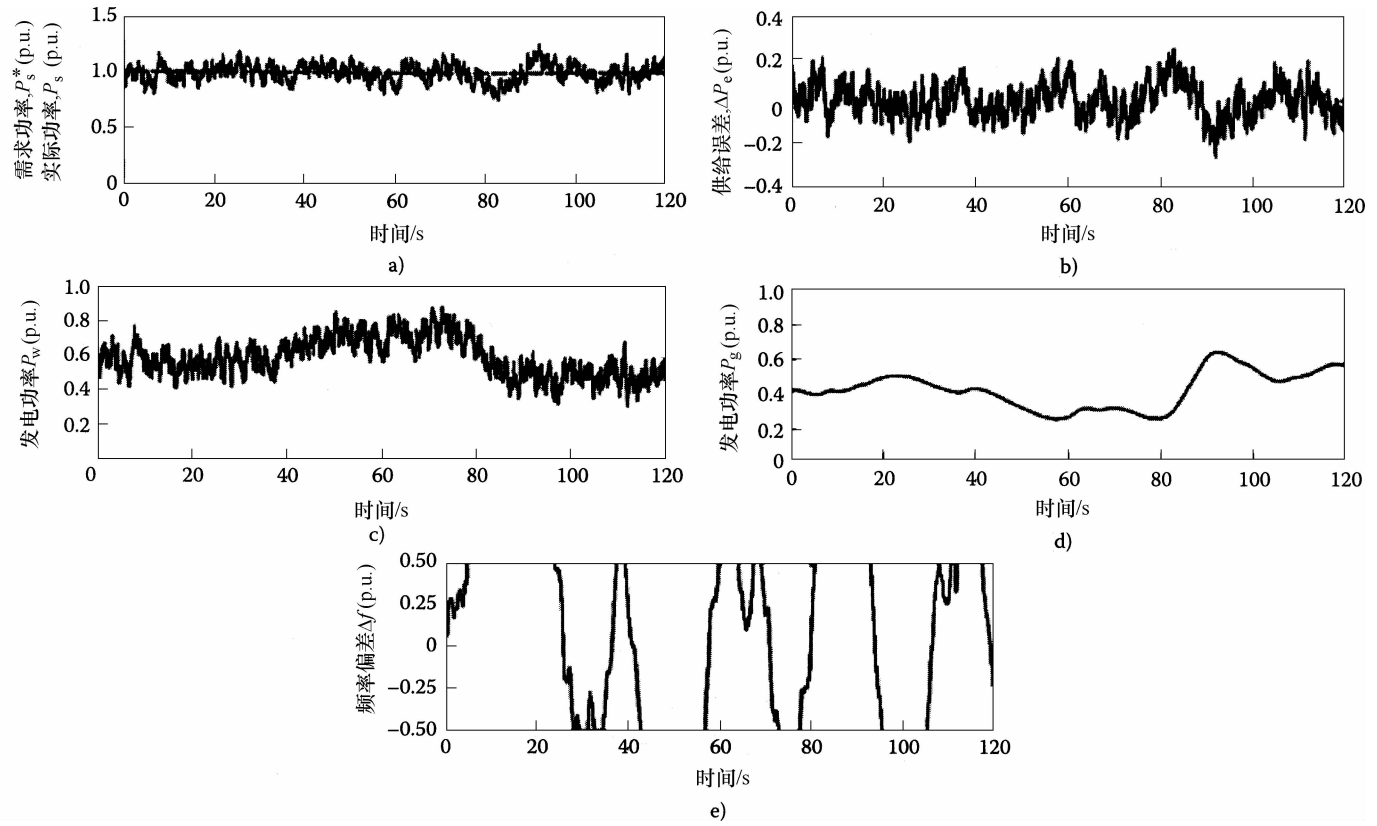


图 8-17 提议系统（情况 1）的模拟结果

a) 需求功率 P_s^* 和供给功率 P_s 。 b) 供给和需求的误差 ΔP_e 。 c) 风轮机的发电功率 P_w 。 d) 柴油机的发电功率 P_g 。 e) 电力系统的频率偏差 Δf

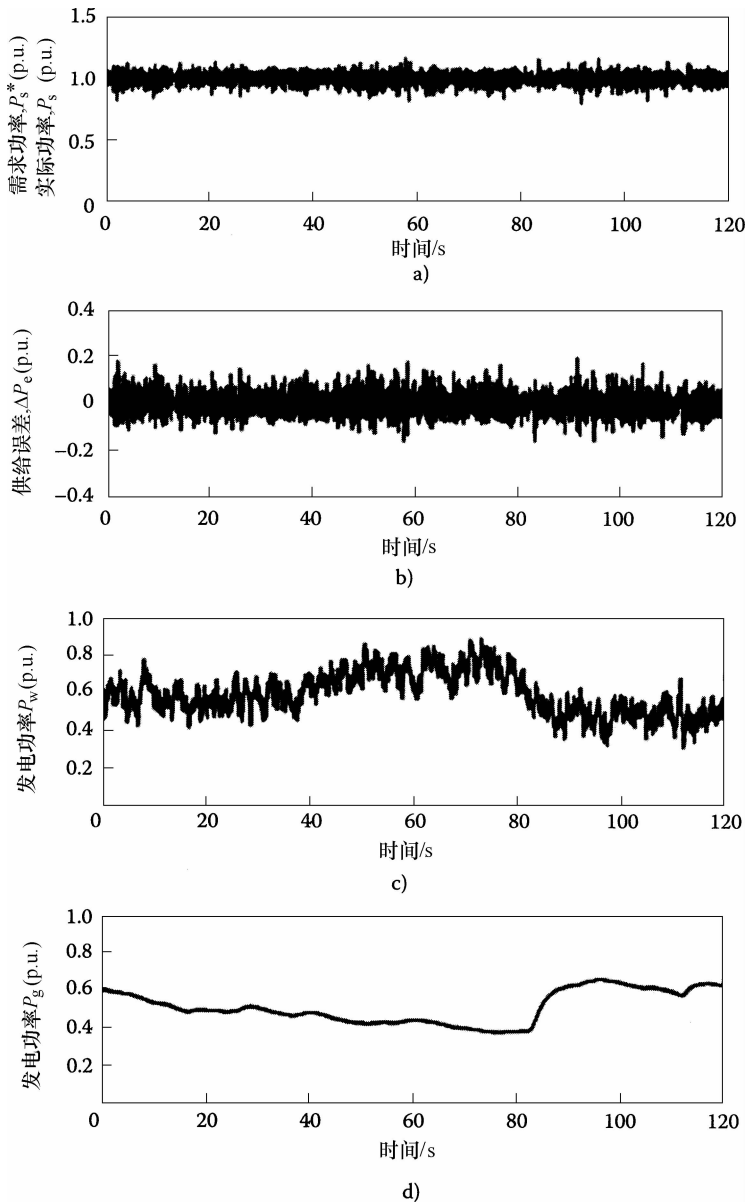
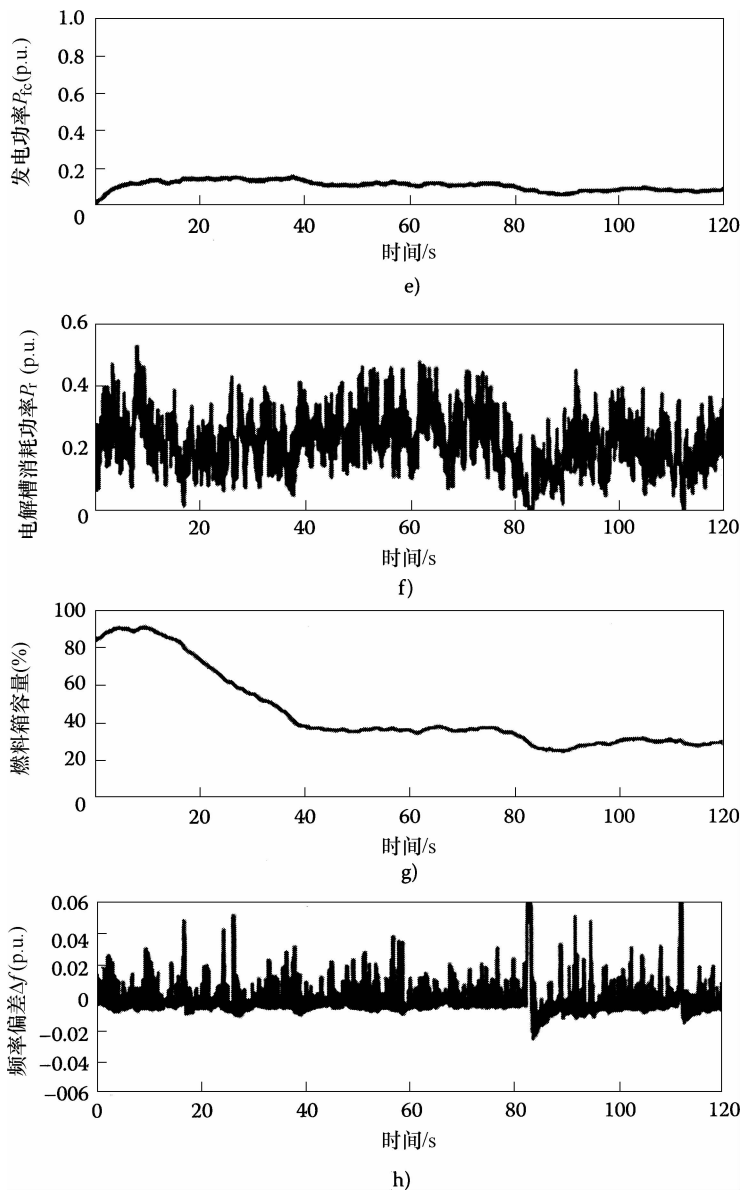


图 8-18 提议系统（情

a) 需求功率 P_s^* 和供给功率 P_s b) 需求和供给误差 ΔP_e
c) 燃料电池的发电功率 P_{fc} f) 输入到电解槽的功率 P_r



况 2) 的模拟结果

- c) 风力涡轮机的发电功率 P_w d) 柴油发电机的发电功率 P_g
- g) 燃料箱容量 h) 电力系统的频率偏差 Δf

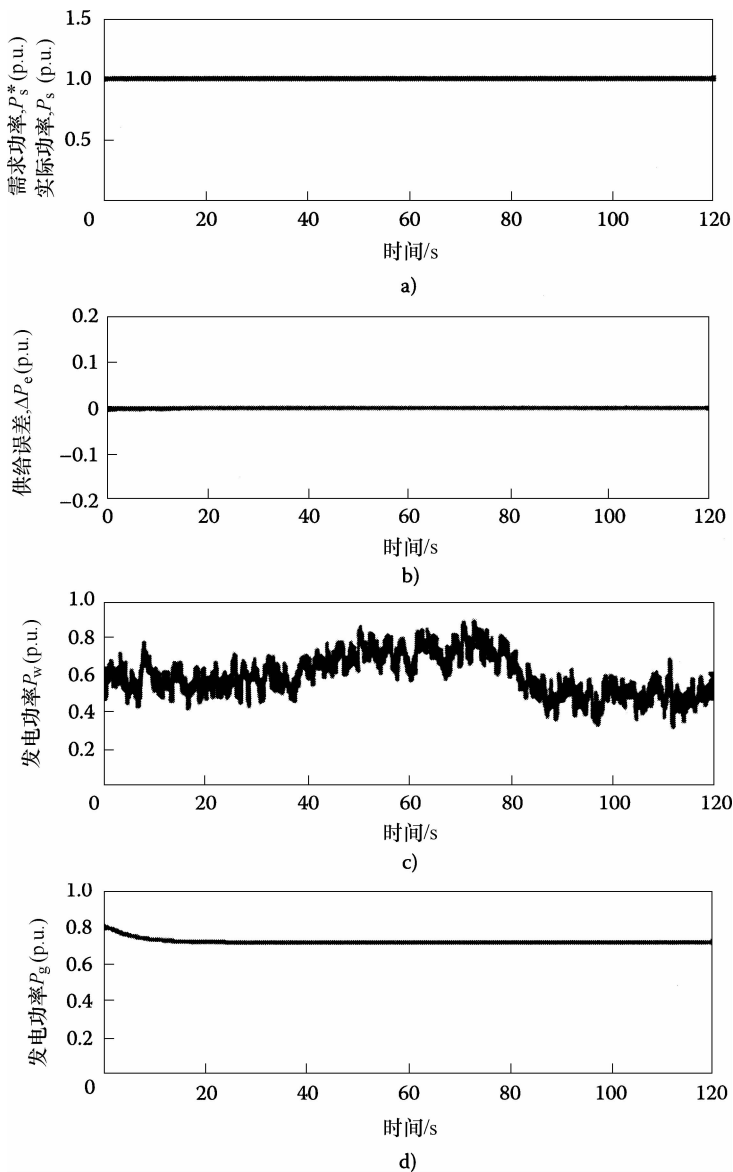
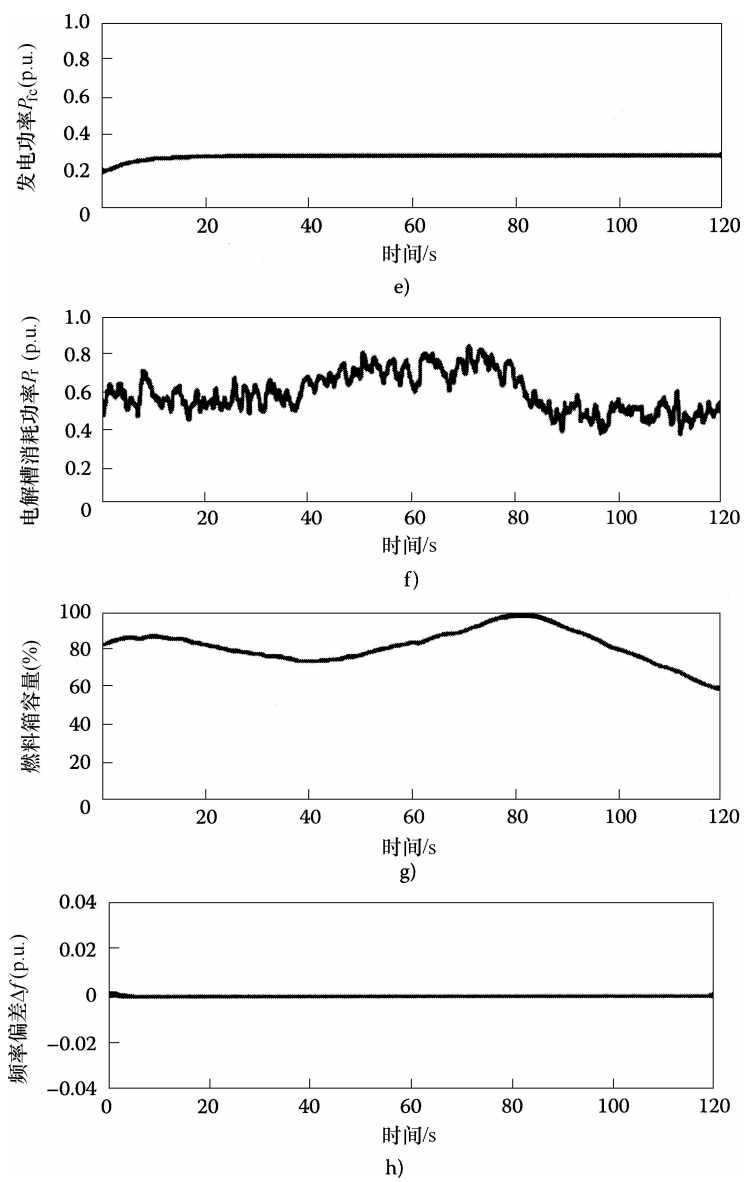


图 8-19 情况 3

a) 需求功率 P_s^* 和供给功率 P_s b) 需求和供给误差 ΔP_e
e) 燃料电池的发电功率 P_{fc} f) 输入到电解槽的功率 P_r



的模拟结果

- c) 风力涡轮机的发电功率 P_w d) 柴油发电机发电功率 P_g
g) 燃料箱容量 h) 电力系统的频率偏差 Δf

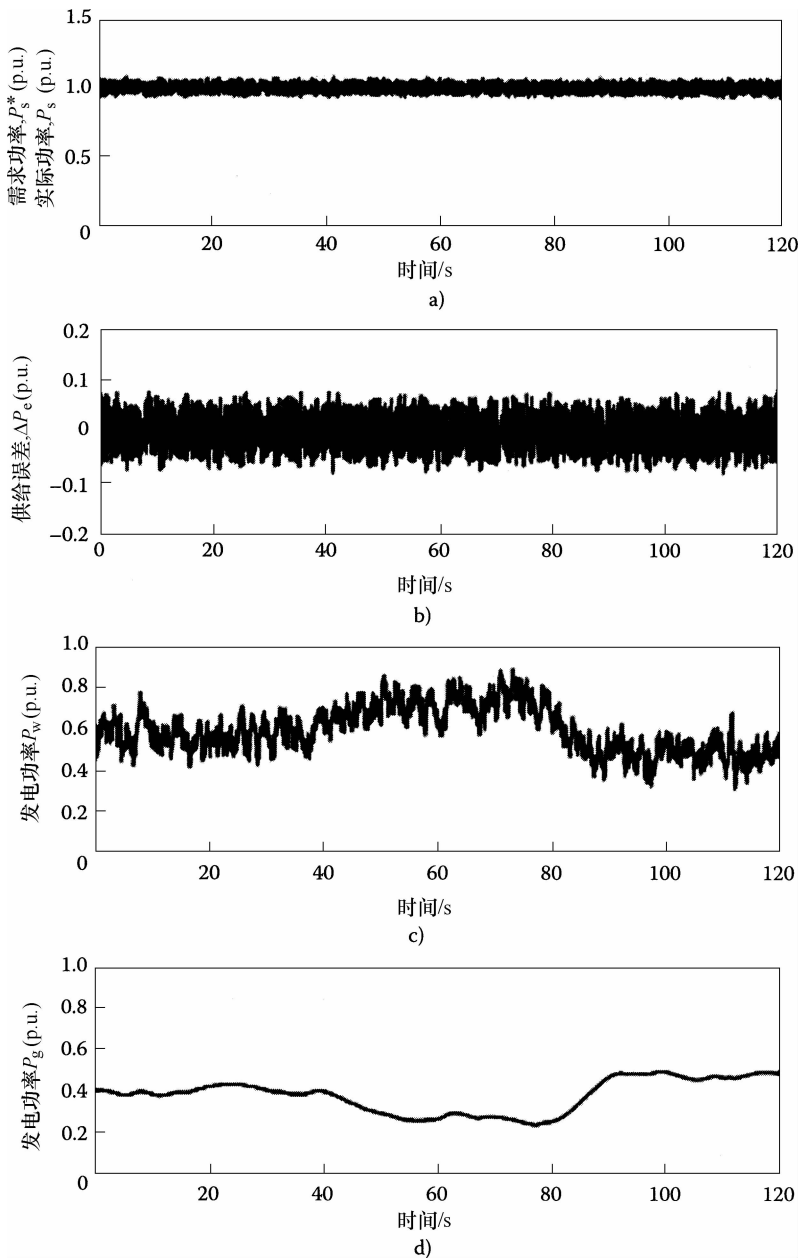
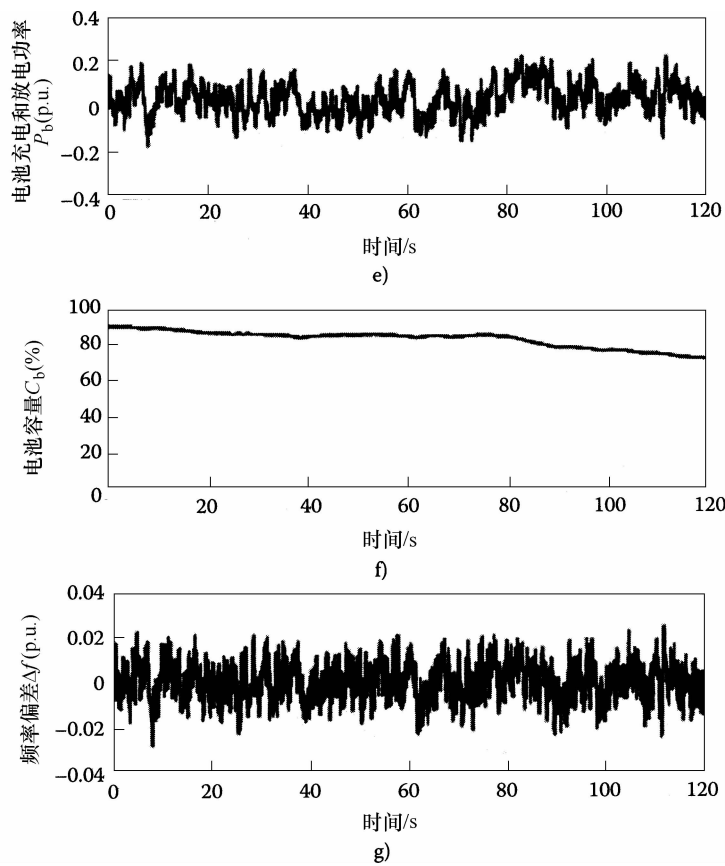


图 8-20 情况 4-1

a) 需求功率 P_s^* 和供给功率 P_s b) 需求和供给误差 ΔP_e
c) 电池充电和放电功率 P_b f) 电池



的模拟结果

c) 风力涡轮机的发电功率 P_w d) 柴油发电机发电功率 P_g
容量 C_b g) 电力系统频率偏差 Δf

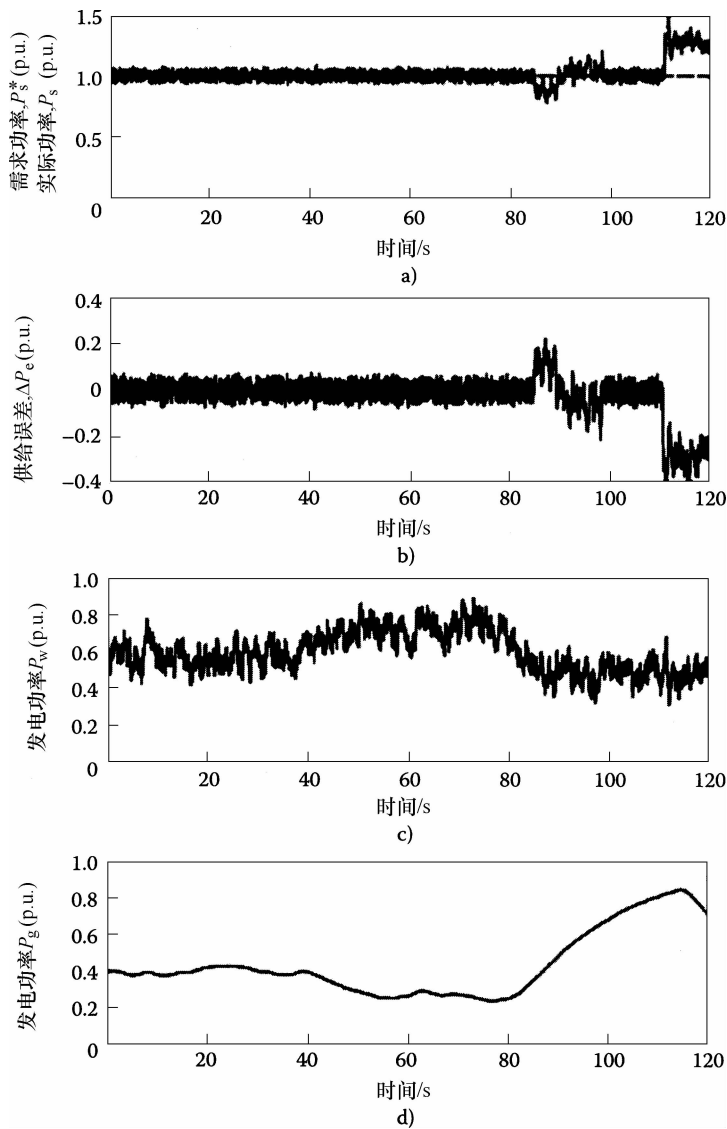
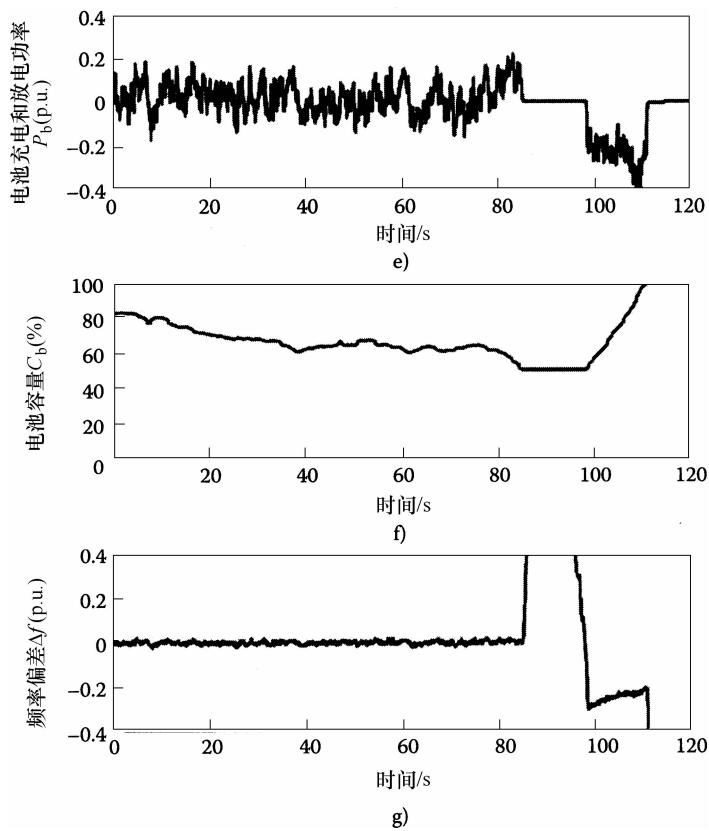


图 8-21 情况 4-2

a) 需求功率 P_s^* 和供给功率 P_s b) 需求和供给误差 ΔP_e
c) 电池充电和放电功率 P_b f) 电池



的模拟结果

c) 风力涡轮机的发电功率 P_w d) 柴油发电机发电功率 P_g
容量 C_b g) 电力系统的频率偏差 Δf

8.3.4 备注和讨论

根据上面的模拟，表 8-5 显示了从情况 1 到情况 4 每个供电系统的特点。在这 4 种情况中，情况 1 的仿真系统是最便宜的系统，但当风力发电机的输出功率突然变化时，它不能为负载需求提供高品质的电力。情况 3 仿真系统，当风力发电机的输出功率突然变化时，能为负载需求提供高品质的电力，但这个系统并不是一个有效的系统，因为所有由风力发电机产生的电力只是用来电解水。此外，这个系统需要大容量的柴油发电机、燃料电池发电机、水电解槽和燃料箱。

情况 4 仿真系统可以为负载需求提供高品质电力。然而，这个系统非常昂贵，因为它需要一个大容量电池。此外，电池要多次充电放电，这会缩短电池的寿命。情况 2 仿真系统与情况 3 和 4 系统相比，更有效而且更便宜，同时保持情况 1 系统负载频率。然而，情况 2 系统配置比情况 1 系统更贵。

表 8-5 每种情况的模拟结果

	风能有效应用	电 力 质 量	成 本
情况 1	○	×	⊙
情况 2	○	○	○
情况 3	×	⊙	△
情况 4	○	○	×

注：×，意味着“不能用”或“非常贵”；
○，意味着“可用”；
△，和表 8-3 有同样的意思；
⊙，意味着“最多的”或“最好的”。

8.4 一个独立风电/光伏/燃料电池发电系统的功率管理

随着能源消耗不断增加，成本高涨，化石燃料要用尽，以及全球环境的恶化，电力工业已经对绿色能源（可再生能源和基于燃料电池的能源）发电系统越来越感兴趣^[29]。风能和太阳能发电是两个最有前途的可再生能源发电技术。风能和光伏太阳能发电系统的增长已经超过了最乐观的估计^[30-32]。因为燃料电池的很多优点（如高效率、零或低的污染气体排放以及灵活的模块化结构）和快速的技术进步，它已经显现出能成为未来绿色能源的极大潜力。然而，上述每种技术都有其自身的缺陷。例如，风能和太阳能高度依赖于气候，而燃料电池需要富氢燃料。不过，因为不同的替代能源可以在一定程度上相互补充，所以多个替代能源的混合系统（使用适当的控制）比单个替代能源系统有更大的潜力来为客户提供更高质量、更可靠的电能。因为这个特点，混合能源发电系统的研究已经引起全世界的关注^[2-12]。

许多可替代能源，包括风能、太阳能、燃料电池、柴油系统，燃气涡轮机和微型燃气轮机可用来建立混合发电系统^[2-12]。然而，现在使用和报道的主要可再生能

源是风能和光伏太阳能^[2-12]。由于风能和太阳能能源的间歇性，单机风能和太阳能发电系统通常需要能量储存设备或其他发电能源来组成混合发电系统。能量存储设备可以是电池组、超级电容组、超导磁储能或燃料电池-电解槽系统。

Wang 和 Nehrir^[29]提出了一个独立的替代能源混合发电系统，包括风能、太阳能、燃料电池、电解槽和电池。风能和太阳能是该系统的主要能源，这样可以充分利用可再生能源，而燃料电池-电解槽组合是备用和长期存储系统。在系统中，他们还用一个备用电池组来提供短时间的瞬时功率。在提议的系统中，交流总线把不同的能源/存储装置连接起来。在这个文献中，他们也讨论了系统配置的细节、系统单元尺寸以及主要组成部件的特点。他们设计了整体电源功率管理方案，来协调电能在不同能源之间的流动。他们已经用实际负载曲线和实际气象资料进行了模拟研究，来验证在不同情况下的系统性能。

8.4.1 系统配置

图 8-22 所示是提议的混合替代能源系统的配置。在这个设计中，风能和光伏

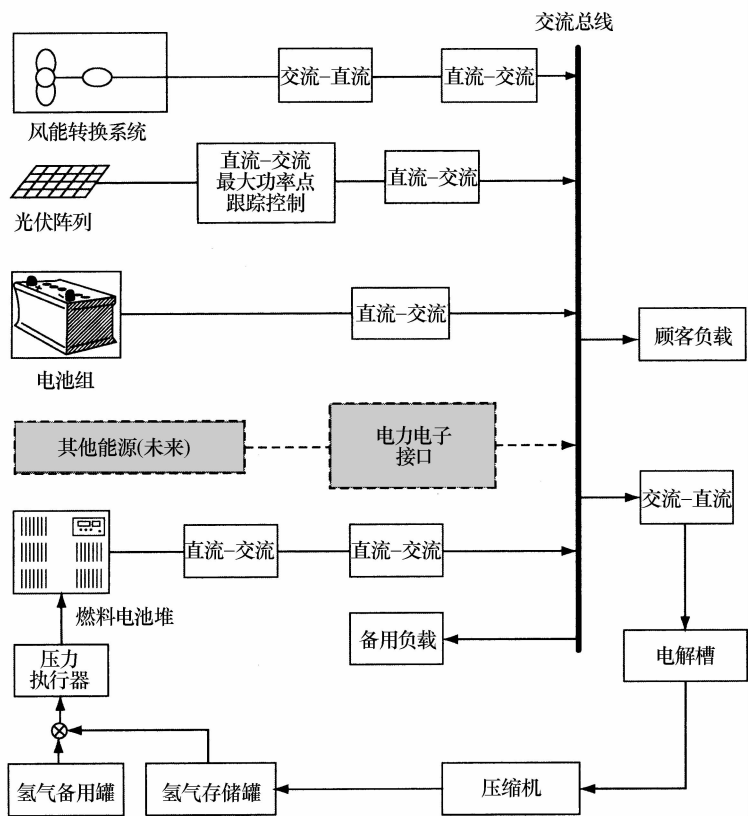


图 8-22 混合可再生（能源）发电系统的系统配置

太阳能发电起主要作用，而燃料电池-电解槽组合作为备用和储能系统。如果风能和/或者太阳能发电有剩余，电解槽就开始生产氢气，然后输送到储氢罐；另一方面，当发电不足时，燃料电池堆开始使用储氢罐里的氢气来生产电能；或者如果储氢罐是空的，就使用备用氢气罐里的氢气。该设计还使用一个电池组来提供电能，以应对负载瞬变、波动，和尖峰。通过适当的电力电子接口电路，他们把不同的能源连接到交流总线。在文献 [29] 中可以找到详细的系统设计。

因为这个混合可再生能源系统是用在公用电力系统中的，所以他们设计风能、太阳能和燃料电池堆使用直流-交流转换器。在文献 [29] 中可以找到这个系统组成部件的详细说明。

8.4.2 功率管理方案

在图 8-23 所示的总控制计划中，风能转换系统是由一个俯仰角控制器控制的，而光伏发电装置是由一个最大功率点跟踪控制器控制的。主要是风能转换系统和光伏发电装置为负载提供电能。发电和负载需求的功率差可以计算如下：

$$P_{\text{net}} = P_{\text{wind}} + P_{\text{PV}} - P_{\text{load}} - P_{\text{sc}} \quad (8-28)$$

式中， P_{sc} 是操作系统自身消耗掉的功率。

我们要考虑两种工作模式：发电过剩模式和发电不足模式。

1. 发电过剩模式

当发电和需求的功率差 P_{net} 大于零，风能和太阳能发电过剩的 P_{net} 被供给电解槽来生产氢气，再通过气体压缩机传输到储氢罐。功率平衡方程变成

$$P_{\text{wind}} + P_{\text{PV}} = P_{\text{load}} + P_{\text{elec}} + P_{\text{comp}} \quad P_{\text{net}} > 0 \quad (8-29)$$

式中 P_{elec} ——电解槽生产氢气消耗的功率；

P_{comp} ——气体压缩机消耗的功率。

2. 发电不足模式

当发电不足时 ($P_{\text{net}} < 0$)，燃料电池堆开始使用储氢罐中的氢气为负载生产电能。功率平衡方程变成

$$P_{\text{wind}} + P_{\text{PV}} + P_{\text{FC}} = P_{\text{load}} \quad P_{\text{net}} < 0 \quad (8-30)$$

式中， P_{FC} 是燃料电池堆生产的电能。

8.4.3 模拟结果

我们用 MATLAB/Simulink 模拟了提议的风/太阳能/燃料电池-电解槽的能源系统。为了验证在不同情况下系统的性能，我们进行了实际负载需求数据和实际天气数据（风速、太阳辐射和空气温度）的仿真研究。这个系统设计提供五个在蒙大拿州西南部家庭的电力需求。在这个模拟研究中，我们使用了文献 [33] 提供的在太平洋西北地区的一个典型房子的每小时平均负载需求。图 8-24 所示的是 5 个房子在 24h 内每小时总的平均负载需求。天气资料是出自于蒙大拿州 Deer Lodge 气象站的在线纪录。这个气象站隶属于太平洋西北农业气象合作网 (AgriMet) [34]。

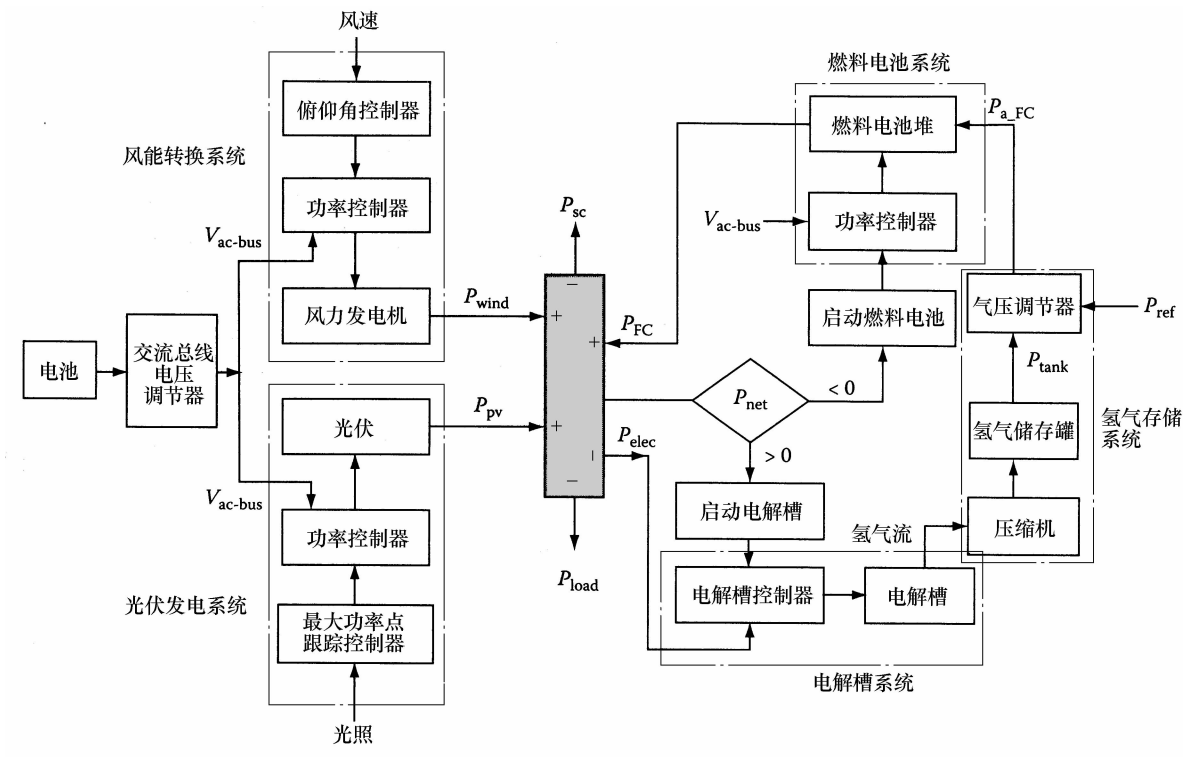


图 8-23 提议的混合替代能源发电系统的总控制方案

(出自 Wang, C. and Nehrir, M. H., *IEEE Trans. Energy Convers.*, 23 (3), 957, 2008. 许可使用)

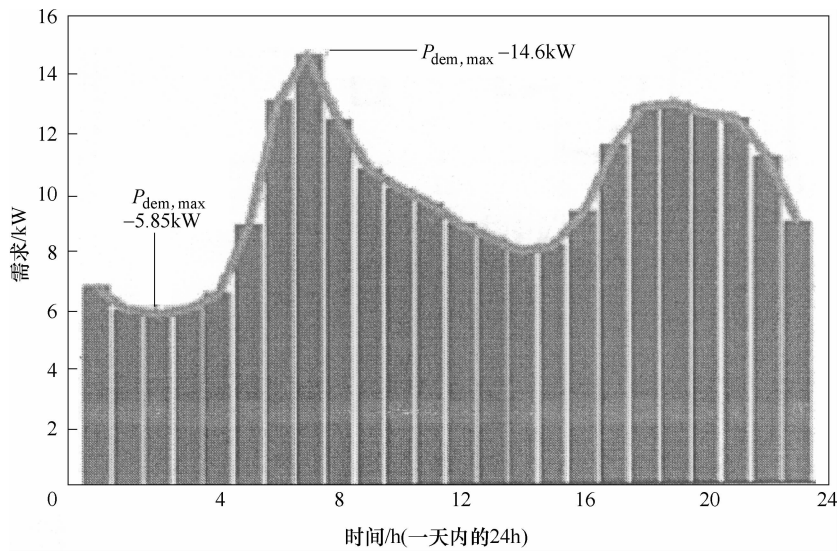


图 8-24 在太平洋西北区五家住户的每小时平均功率需求

我们用典型的冬季一天和夏季一天，模拟研究了提议的功率管理方案。在这两种情况下，我们都用了相同的负载需求。

1. 冬季情景

模拟冬天情景的气象数据是在 2006 年 2 月 1 日收集的。图 8-25 所示为在混合发电系统中，风力发电装置输出功率在 24h 模拟期间内的变化。图 8-26 所示为光伏性能受温度的影响。图 8-27 所示为在 24h 模拟期间内，可用于电解槽生产氢气的功率。图 8-28 所示为加在电解槽上的直流电压和电解槽电流。图 8-29 所示为燃料电池堆实际发电功率。

2. 夏天情景

图 8-30 和 8-31 所示分别是在 24h 模拟期间，混合发电系统从风能转换系统和光伏阵列的输出功率。当 $P_{\text{net}} > 0$ ，剩余的发电功率可用于产生氢气。图 8-32 所示为在模拟期间氢气的产生速率。当 $P_{\text{net}} < 0$ ，风能和太阳能发电的总和不够满足负载需求。在这种情况下，燃料电池堆启动来使用氢气罐储存的氢气生产短缺的电。图 8-33 所示为相应的氢气消耗率。图 8-34 所示为在夏天情景研究中，储氢罐压力在 24h 模拟期间中的变化。

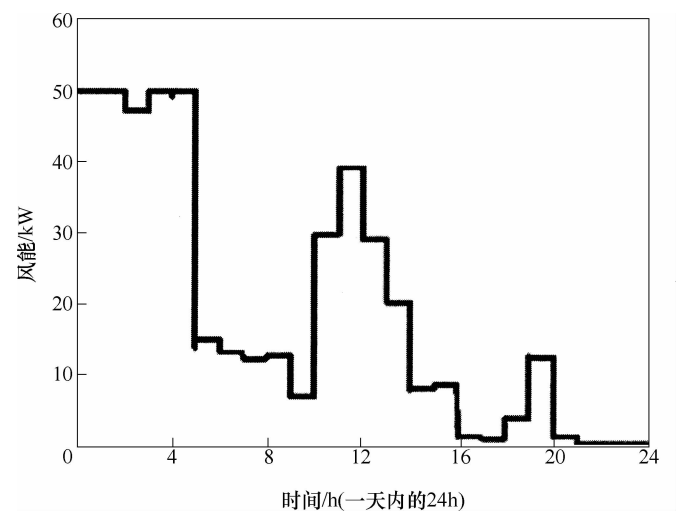


图 8-25 在冬季情景研究中的风能

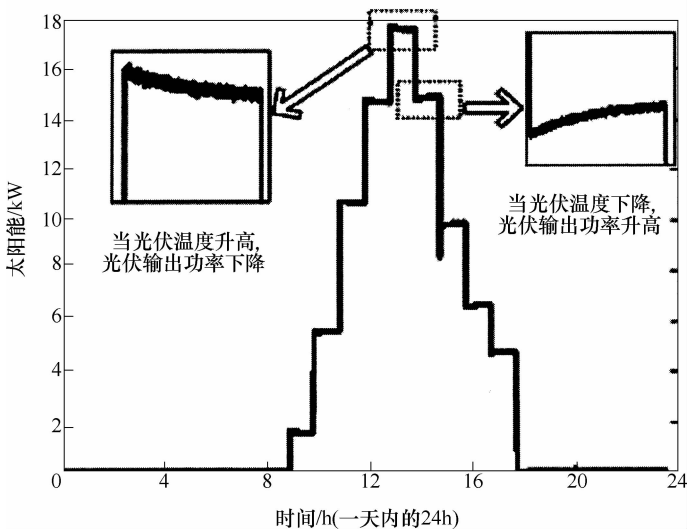


图 8-26 在冬季情景研究中的光伏太阳能

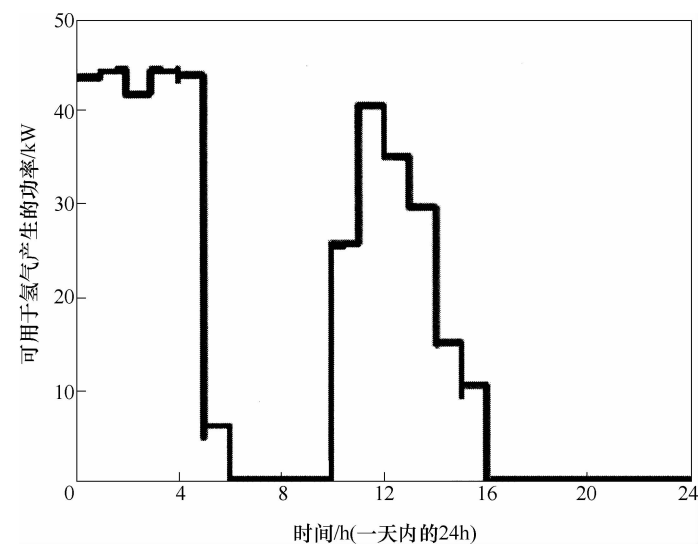


图 8-27 在冬季情景研究中可用于生产氢气的功率

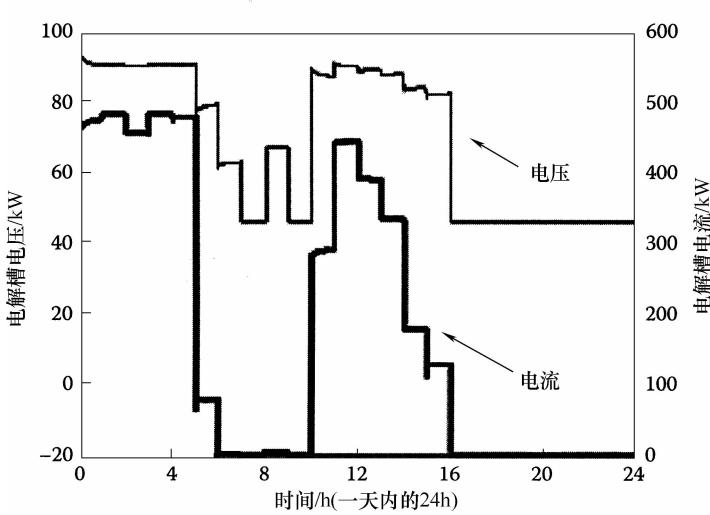


图 8-28 在冬季情景研究中电解槽的电压和电流

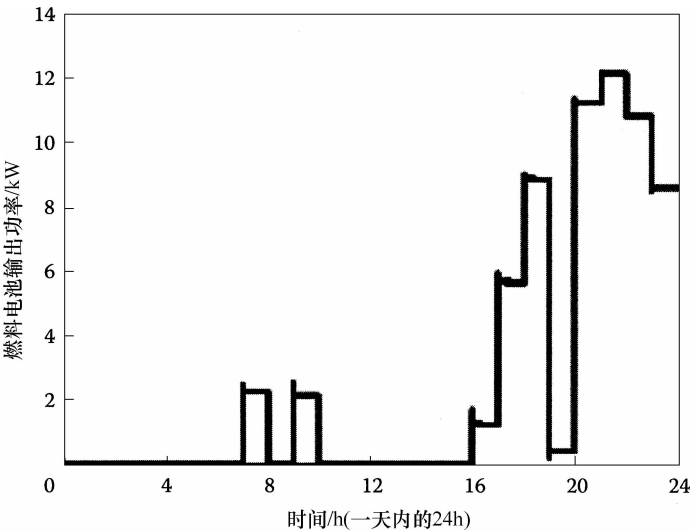


图 8-29 在冬季情景研究中燃料电池堆的供电功率

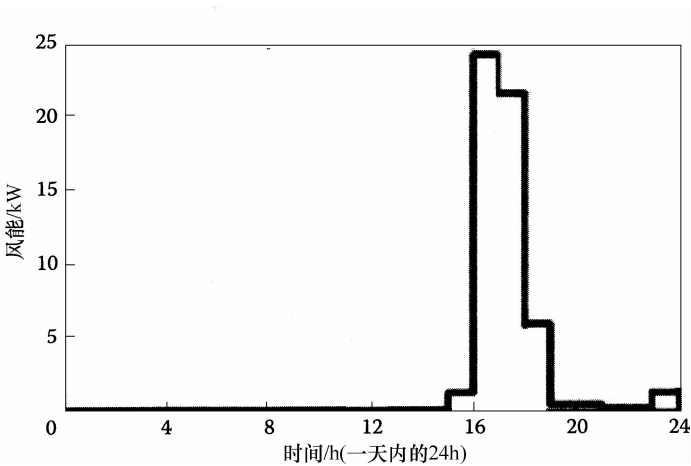


图 8-30 在夏季情景研究中的风能

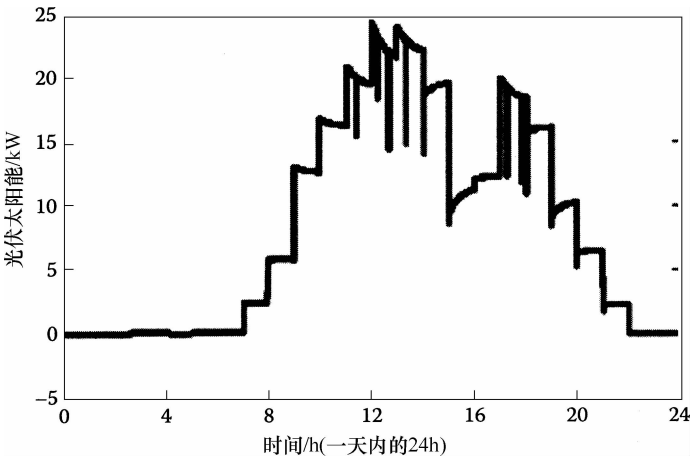


图 8-31 在夏季情景研究中的光伏太阳能

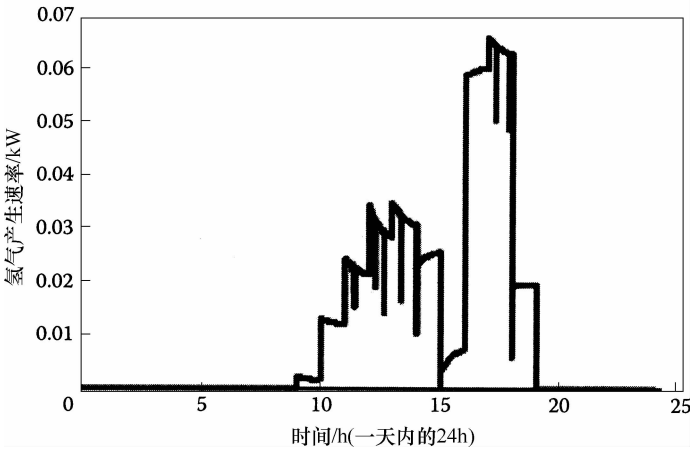


图 8-32 在夏季情景研究中的氢气产生速率

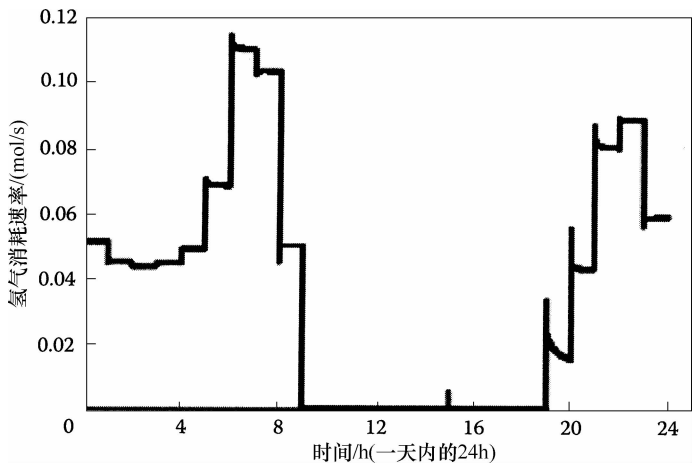


图 8-33 在夏季情景研究中的氢气消耗速率

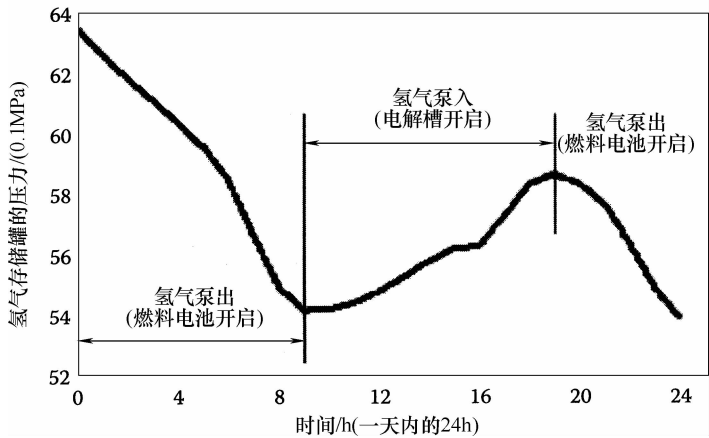


图 8-34 在夏季情景研究中的 24h 内氢气罐压力变化

8.4.4 小结

本节提出了一个交流连接的独立风力/光伏/燃料电池替代能源发电系统。风能和光伏系统是主要发电来源；电解槽是转储负载，使用任何过剩的电能供应来生产氢气；燃料电池系统是候补设备，当电力不足时才为系统供应电能。我们给出了主

要组件的特性,包括风能转换系统、太阳能、燃料电池和电解槽系统,也介绍了混合能源发电系统的整体控制和功率管理方案。我们利用 MATLAB/Simulink 开发了这个混合发电系统的仿真模型。我们还用太平洋西北地区的实际负载曲线和蒙大拿州 Deer Lodge 收集的实际天气数据模拟研究,验证了系统在不同情况下(冬季和夏季)的性能。仿真结果表明,整体功率管理方案是有效的,并且所提出的混合替代能源发电系统是可行的。

8.5 混合可再生能源系统的负载流量分析

配电系统是电网的三个组成部分之一。传统的配电系统通常包括馈线的电源(变电站)和沿着馈线的负载。负载流量分析是用于配电自动化(Distribution Automation, DA)和需求方管理(Demand-Side Management, DSM)的强大工具。对于传统的配电系统,已经提出了几个典型的负载流量算法。

随着分布式发电机(Distributed Generators, DGs)的到来,因为它们的优点,它们有希望成为分布式配电系统中用的电源。在配电系统中安装分布式发电机,可能会引起反向功率流动和功率注入到馈线中。因为这些问题涉及配电自动化、分布式发电机和需求方管理,所以并不容易处理。此外,在分布式馈线中安装分布式发电机参与系统运行,使我们有必要重新研究以下的问题,包括功率流、电能质量、铁磁谐振、电压控制、损失减少、保护装置协调和电压闪变等等。由于电压曲线直接关系到电能质量和客户的满意度,我们应首先提出一个高效强大的分布式发电机三相负载流量法^[35]。

这一章将简要地介绍包括分布式发电机的负载流量分析。为了实现这个目的,我们要先简要介绍负载流量分析和它典型的算法。

8.5.1 配电系统的负载流量分析

现在已经有成熟的电力传输系统负载流量分析方法。典型的方法包括 Gauss-Seidel 法、Newton-Raphson 法和快速解耦法。所有这些方法可以直接应用于配电系统。而且针对配电系统自身放射结构的特点,已经提出了一些新方法。

配电系统已经有四种典型的流量分析方法: Gauss-Seidel 法、Newton-Raphson 法、DistFlow 法和精确法。在本节中,我们将简要介绍其中三种方法。

1. Gauss-Seidel 法

对于传输网络, Gauss-Seidel 算法基本是迭代数值法,优点是过程简单,可以直接用于配电系统。Gauss-Seidel 算法,反复尝试寻找系统线性方程组的解,直到迭代的解是在预定可接受误差范围内。这是个强大可靠的负载流量方法,即使面对极为复杂的电源系统都是收敛的。Gauss-Seidel 算法的迭代过程,给出如下:

$$V_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left(\frac{P_k - iQ_k}{(V_k^i)^*} - \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n^{(i)} \right) \quad (8-31)$$

式中 $V_k^{(i+1)}$ 和 $V_k^{(i)}$ ——第 $i+1$ 次和第 i 次迭代的总线 k 电压值;

P_k 和 Q_k ——总线 k 注入的有功功率和无功功率;

Y_{kk} 和 Y_{kn} ——阻抗矩阵元素。

2. Newton-Raphson 法

Guass-Seidel 法的缺点是每条总线都是独立处理的, 即每条总线在修正后, 需要修正所有与它相连的总线。然而, Newton-Raphson 法是根据同时考虑所有相互作用来计算修正的。

为了解非线性方程 $f(x) = b$, 我们用牛顿法来调整与函数独立变量的 Δx , 使函数的误差趋向零。函数 $f(x)$ 对于某个特定 x^0 的泰勒展开是

$$f(x^0) + \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x^0} \Delta x + \varepsilon = b \quad (8-32)$$

设定误差 ε 为零, 我们得到

$$\Delta x = \left(\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x^0} \right)^{-1} [b - f(x^0)] \quad (8-33)$$

上述方程是每个迭代调整的计算式。

把上述想法运用到电力系统中, 就可以进行功率流分析的 Newton-Raphson 法推导。

对于每个总线 i , 有以下功率平衡方程:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (8-34)$$

式中 $P_i + jQ_i$ ——总线 i 的复功率;

V_i 和 I_i ——总线 i 的电压和注入电流相量。

变量是电压大小 $|V_i|$ 和电压角 θ_i 。因此, 我们需要把功率平衡方程写成:

$$P_i + jQ_i = V_i \left(\sum_{k=1}^N Y_{ik} V_k \right)^* = |V_i|^2 Y_{ii}^* + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N Y_{ik}^* V_i V_k^* \quad (8-35)$$

对上述方程求导, 并考虑这个方程的实部和虚部, 我们得到:

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \sum_{k=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \sum_{k=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial |V_k|} \Delta |V_k|, \quad i = 1, 2, \dots, N \\ \Delta Q_i &= \sum_{k=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \sum_{k=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial |V_k|} \Delta |V_k| \end{aligned} \quad (8-36)$$

根据式 (8-36), 可以得到迭代的调整计算:

$$\Delta X = [J]^{-1} \Delta Z \quad (8-37)$$

式中

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta|V_1| \\ \Delta\theta_2 \\ \Delta|V_2| \\ \vdots \end{bmatrix}; \quad \Delta Z = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \end{bmatrix}; \quad [J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_1|} & \cdots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

关于 Newton-Raphson 法功率流分析的详细资料, 读者可参考有关电力系统分析或计算的任何书籍。

3. DistFlow 法

这个方法是由 Mesut E. Baran 和 Felix F. Wu 开发的, 目的是解决电容器的优化布局。

根据放射状分配系统的结构特性, 放射状分配系统的功率流方程也称为 Dist-Flow 方程, 包括分支流方程和与每个横向相关的边界条件, 其中包含被看做是零横向的主馈线。它们的形式如下:

$$x_{ki+1} = f_{ki+1}(X_{ki}, u_{ki+1}), \quad k = 0, 1, \dots, l \quad (8-38)$$

$$x_{k0} = x_{0k}; \quad x_{kn} = x_{kn_2} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, nk - 1 \quad (8-39)$$

式中

$$X = [x_i^T \cdots x_l^T x_0^T]^T$$

$$x_k = [x_{k0}^T \cdots x_{kn}^T]^T$$

对于一个包括主馈线和 m 个主横向的放射分布分配系统, 我们需要解以下 $2(m+1)$ 个方程:

$$P_{0n} = \hat{P}_{0n}(Z_{00}, Z_{10}, \dots, Z_{l0}, |V_{00}|) = 0$$

$$P_{knk} = \hat{P}_{knk}(Z_{00}, Z_{10}, \dots, Z_{j0}, |V_{00}|) = 0, \quad j \leq k, \text{ and } k = 1, 2, \dots, m \quad (8-40)$$

$$Q_{knk} = \hat{Q}_{knk}(Z_{00}, Z_{10}, \dots, Z_{j0}, |V_{00}|) = 0$$

或者向量形式的方程:

$$H(Z) = 0 \quad (8-41)$$

式中, $Z = [Z_{10}^T \cdots Z_{l0}^T Z_{00}^T]^T$ 是状态变量向量。

用 Newton-Raphson 法可以解这个负载流量问题:

步骤 1: 对于估计给出的 Z^0 , 计算 $H(Z^0)$ 的不匹配。

步骤 2: 生成雅可比矩阵 $J(Z^0) = \partial H / \partial Z|_{Z=Z^0}$

步骤 3: 解下面的方程系统, 来更新状态 Z :

$$J(Z^0) \Delta Z^0 = -H(Z^0)$$

DistFlow 法的细节详见文献[36, 37]。

8.5.2 在负载流量分析中的分布式发电机建模

在负载流量分析中为分布式发电机建模, 对配电系统的操作和控制是重要的问

题。已经有人努力解决了部分问题^[38-40]。Feijoo 和 Cidras^[40]提出了几个有用的分布式发电机模型可以用于分布负载流量分析。文献 [41-43] 也有些提议的工作可以满足其中的一些要求。Chen 等人^[41]用高斯隐式 Z-矩阵法来求解三相负载流问题。为了严格的系统分析，他们也模拟了变压器和热电联供装置。高斯法是一般网络负载流量分析的传统方法。但是，配电系统通常有放射状或弱网状结构。因此，文献[42，43]的研究提出了一些新思路来处理特殊的配电馈线网络特性。Cheng 和 Shirmohammadi^[42]提出了一种补偿技术，在解决方案中，使用前进/后退扫描算法。他们还推导了一个计算电压大小和电流注入之间增量关系的灵敏度矩阵，用于有特定电压的发电机总线。文献 [43] 提出了求解三相配电功率流的直接法技术，充分利用了馈线的网络特点。为了得到功率流的解，他们用了两个已改进的矩阵和矩阵乘法。这两个矩阵是总线注入分支电流（Bus-Injection to Branch-Current, BIBC）矩阵和分支电流到总线电压（Branch-Current to Bus-Voltage, BCBV）矩阵。然而，文献 [43] 并没有涉及不同类型分布式发电机的一体化。

图 8-35 是配电系统分布式发电机组的例子。燃料电池、太阳能电池和风力涡轮机组成的混合可再生能源发电系统，通过静态功率转换器与电力系统接口，连接到配电网络。

Teng^[35]提出三种用于负载流量分析的分布式发电机模型。

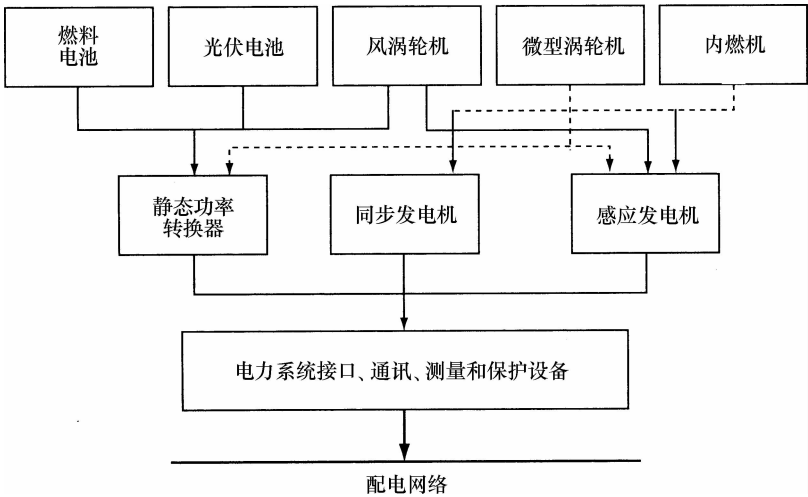


图 8-35 一个分布式发电机组的例子

8.5.2.1 分布式发电机的几个模型

1. 恒功率因数模型

恒功率因数模型是电力系统中常用的模型。它适用于可控制的分布式发电机，

如同步分布式发电机和电力电子分布式发电机。在此模型中,需要给出有功功率输出值 $P_{i,g}$ 和分布式发电机功率因数 $pf_{i,g}$ 。一旦给出这两个值,就可以计算出分布式发电机的无功功率和注入电流:

$$Q_{i,g} = P_{i,g} \tan[\cos^{-1}(pf_{i,g})] \quad (8-42)$$

$$I_{i,g} = \left(\frac{P_{i,g} + jQ_{i,g}}{V_{i,g}^k} \right) \quad (8-43)$$

式中, $Q_{i,g}$ 、 $I_{i,g}$ 和 $V_{i,g}^k$ 分别是分布式发电机在第 k 次迭代时的无功功率、注入电流和输出电压。

2. 可变无功功率模型

使用感应发电机作功率转换装置的分布式发电机几乎像可变无功功率发电机。一个典型的例子是风力涡轮机感应发电机,可以用风力发电机功率曲线来计算它的有功功率输出。风力发电机消耗的无功功率可以表达成有功功率的函数^[40]:

$$Q_{i,g}^l = -Q_0 - Q_1 P_{i,g} - Q_2 P_{i,g}^2 \quad (8-44)$$

其中 Q_0 、 Q_1 和 Q_2 可以通过实验得到。

根据图 8-36 的等效电路,无功功率输出可以计算如下:

$$Q_{i,g} = Q_{i,g}^l + Q_{i,g}^C \quad (8-45)$$

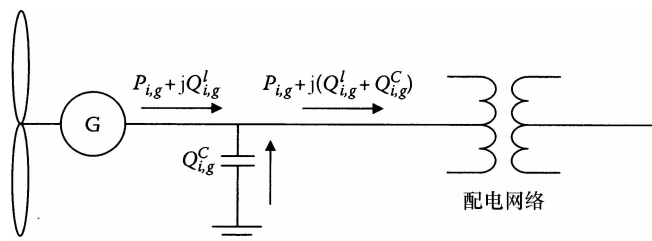


图 8-36 风力涡轮机感应发电机的等效电路

3. 恒电压模型

这个模型通常用于大规模可控分布式发电机。有功功率输出和总线电压大小是给定值。对于 8.4.1 节中介绍的三种方法,为迭代需要计算无功功率输出值:

$$\Delta Q_{i,g}^{k,m} = V_{i,g}^{\text{mis}} (2 |X_g|)^{-1} \quad (8-46)$$

$$V_{i,g}^{\text{min}} = (|V_{i,g}^{\text{spec}}|)^2 - (|V_{i,g}^{k,m}|)^2 \quad (8-47)$$

$$[X_g] = \text{img}([BCBV_i][BIBC_i]) \quad (8-48)$$

式中 $\Delta Q_{i,g}^{k,m}$ ——第 m 次内迭代和第 k 次外迭代必需的无功功率变化;

$V_{i,g}^{\text{mis}}$ ——第 m 次内迭代和第 k 次外迭代的计算电压与给定电压的平方电压不匹配;

$[BIBC_i]$ ——对应总线 i 的 $[BIBC]$ 列向量;

$[BCBV_i]$ ——对应总线 i 的 $[BCBV]$ 行向量。

两个矩阵[BIBC]和[BCBV]定义如下：

1) [BIBC]描述了电流注入[I]和分支电流[B]之间的关系。

$$[B] = [BIBC][I] \tag{8-49}$$

2) [BCBV]描述了分支电流[B]和总线电压[V]之间的关系：

$$[V_0] - [V] = [BCBV][B] \tag{8-50}$$

我们把这三个模型用于负载流量分析，可以计算配电系统的状态。

8.5.2.2 测试结果

我们在 Pentium-III 电脑 Windows-XP 中用 Borland C++ 语言实现了提出的模型。图 8-37 所示为用于测试的馈线。

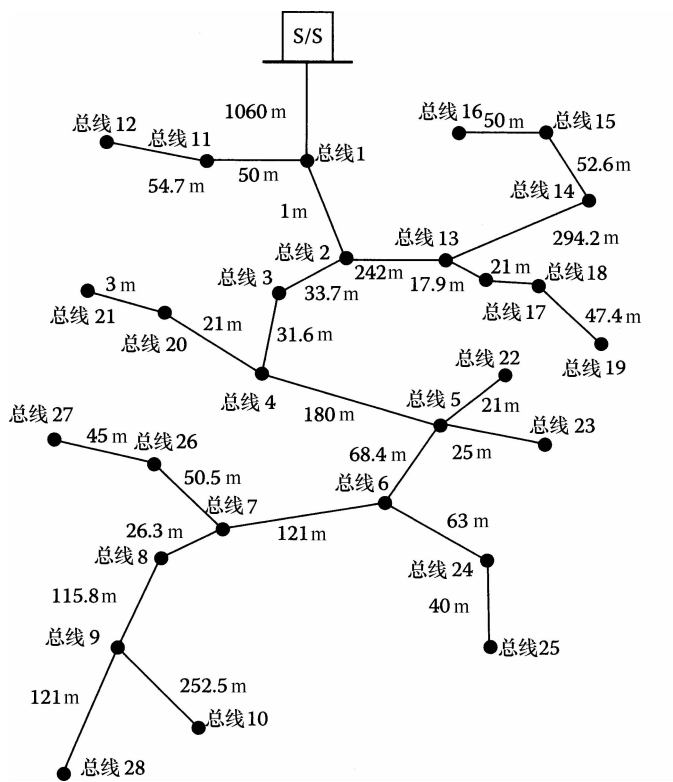


图 8-37 测试馈线

表 8-6 和表 8-7 分别显示了这个馈线的负载数据和线路长度。图 8-38 显示了没有安装分布式发电机总线的 A、B 和 C 相电压曲线。图 8-38 还显示了这个馈线是不平衡的，因此，三相负载流量分析可以给出精确解。

表 8-6 测试馈线的负载数据

总线号	相 A		相 B		相 C	
	<i>P</i> /kW	<i>Q</i> /kVAR	<i>P</i> /kW	<i>Q</i> /kVAR	<i>P</i> /kW	<i>Q</i> /kVAR
1	139.9	90.4	31.9	20.6	31.9	20.6
2	0	0	0	0	0	0
3	28.4	48.3	56.0	-0.4		
4	154.1	73.8	74.6	24.5	74.6	24.5
5	101.5	76.2	101.5	76.2	183.4	124.7
6			29.9	69.9	75.5	9.1
7	26.1	12.6	26.1	12.6	84.0	40.7
8			37.7	67.1	77.0	0.9
9	105.0	20.2	34.6	56.2		
10	84.0	63.0	84.0	63.0	141.5	98.7
11	113.2	61.1	113.2	61.1	212.4	109.1
12	165.1	91.3	81.4	46.1	81.4	46.1
13	367.3	133.3	367.3	133.3	367.3	133.3
14	30.5	13.9	30.5	13.9	108.9	58.3
15			75.3	85.9	88.8	-6.5
16	20.5	33.2	104.6	39.6		
17	74.4	64.6	34.0	1.1		
18	67	44.8	14.2	0.2		
19			67.5	109.5	128.5	-3.7
20	98.4	33.6	36.2	13.1	36.2	13.1
21	7.8	8.8	11.5	-2.4		
22	29.9	16.1	73.9	49.1	29.9	16.1
23	173.7	68.3	72.1	34.9	72.1	34.9
24			47.9	-3.5	75.4	69.7
25	88.2	23.2	26.0	48.5		
26	75.7	19.0	75.7	19.0	207.0	51.9
27	23.5	1.2			87.2	66.3
28	79.5	49.3	79.5	49.3	187.7	130.4
总需求	2053.7	1046.2	1787.1	1088.4	2350.7	1038.2

表 8-7 测试馈线的线路长度

线 号	始点总线	终点总线	长度/m
1	S/S	1	1060
2	1	2	1
3	2	3	33.7
4	3	4	31.6
5	4	5	180
6	5	6	68.4
7	6	7	121
8	7	8	26.3
9	8	9	115.8
10	9	10	252.5
11	1	11	50
12	11	12	54.7
13	2	13	242
14	13	14	294.2
15	14	15	52.6
16	15	16	50
17	13	17	17.9
18	17	19	21
19	18	19	47.4
20	4	20	21
21	20	21	3
22	5	22	21
23	5	23	25
24	6	24	63
25	24	25	40
26	7	26	50.5
27	26	27	45
28	9	28	121

在测试中，两个风力涡轮机被燃料电池发电机代替，并在恒电压下工作。我们模拟可以得到图 8-39 所示的电压曲线。在这种情况下，在最远端总线 28 给定的电压大小是 0.97p. u。因此，从图 8-39a 中可以看到，在总线 28 的电压是 0.97p. u，这个馈线的不平衡状况得到了改善。图 8-39b 显示了总线 1-10 的电压曲线。我们用分布式发电机恒电压模型进行负载流量分析，结果显示在图 8-39 中。

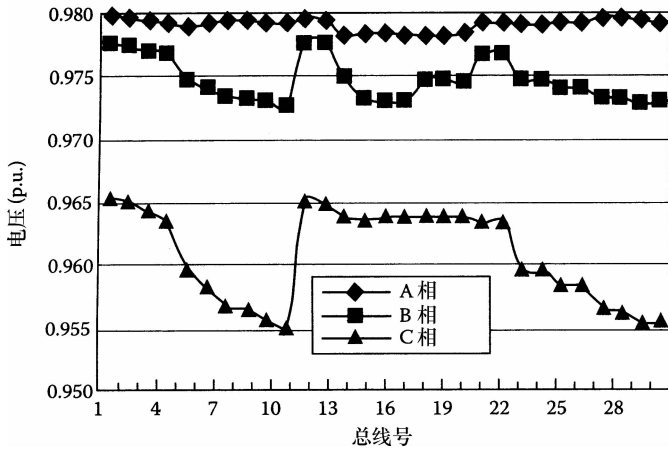


图 8-38 没有安装分布式发电机总线的 A、B 和 C 相电压曲线

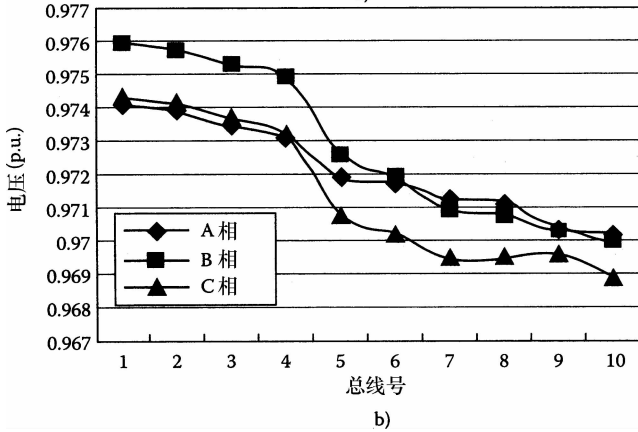
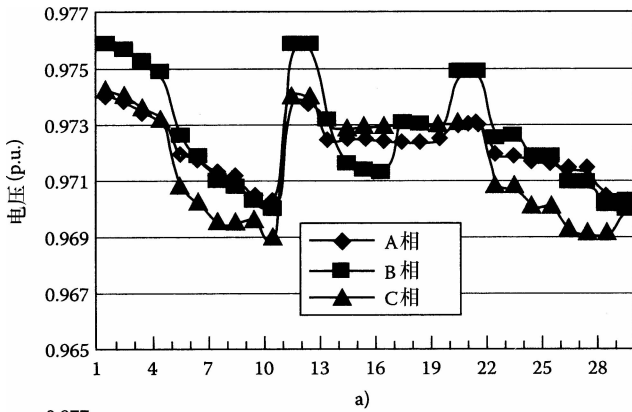


图 8-39 在恒定电压模型中工作的分布式发电机电压曲线
a) 测试馈线的总线电压曲线 b) 总线 1-10 的电压曲线

8.5.2.3 小结

本节提出了用于三相负载流量分析的分布式发电机数学模型。在流量分析中,根据功率输出的特点,分布式发电机可以使用恒功率因素模型、恒电压模型或可变无功功率模型。测试结果表明,提出的方法可以有效地用于深入配电馈线中分析分布式发电机。同时,肯定了提出的矩阵结构和原负载流量方法的功用。提出的BIBC和BCBV矩阵有可能应用在其他领域,如不对称短路电流计算、优化电容器安置、馈线重组问题等。

参 考 文 献

1. G.D. Burch, *Hybrid Renewable Energy Systems*. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/hybrids/Gary%20Burch%208.21.01.pdf>.
2. K. Agbossou, M. Kolhe, J. Hamelin, and T.K. Bose, Performance of a stand-alone renewable energy system based on energy storage as hydrogen, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(3), 633–640, 2004.
3. D.B. Nelson, M.H. Nehrir, and C. Wang, Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid Wind/PV/fuel cell systems, *Renewable Energy*, 31(10), 1641–1656, 2006.
4. S.H. Chan, H.K. Ho, and Y. Tian, Multi-level modeling of SOFC-gas turbine hybrid system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(8), 889–900, 2003.
5. L.A. Torres, F.J. Rodriguez, and P.J. Sebastian, Simulation of a solarhydrogen-fuel cell system: Results for different locations in Mexico, *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(11), 1005–1010, 1998.
6. F. Bonanno, A. Consoli, A. Raciti, B. Morgana, and U. Nocera, Transient analysis of integrated diesel-wind-photovoltaic generation systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(2), 232–238, 1999.
7. K. Strunz and E.K. Brock, Stochastic energy source access management: Infrastructure-integrative modular plant for sustainable hydrogenelectric co-generation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 1129–1141, 2006.
8. E.S. Abidin, A.M. Osheiba, and M.M. Khater, Modeling and optimal controllers design for a stand-alone photovoltaic-diesel generating unit, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(3), 560–565, 1999.
9. F. Giraud and Z.M. Salameh, Steady-state performance of a gridconnected rooftop hybrid wind-photovoltaic power system with battery storage, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 16(1), 1–7, 2001.
10. W.D. Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataramanan, and V. Gerez, Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 13(1), 70–75, 1998.
11. H. Sharma, S. Islam, and T. Pryor, Dynamic modeling and simulation of a hybrid wind diesel remote area power system, *International Journal of Renewable Energy Engineering*, 2(1), 19–25, 2000.
12. R. Chedid, H. Akiki, and S. Rahman, A decision support technique for the design of hybrid solar-wind power systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 13(1), 76–83, 1998.
13. D.L. Elliott and M.N. Schwartz, *Wind Energy Potential in the United States*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1993. http://www.nrel.gov/wind/wind_potential.html (current May 2004).

14. P. Gipe, *Wind Energy Comes of Age*, New York: John Wiley & Sons, 1995.
15. S.S. Hutson, N.L. Barber, J.F. Kenny, K.S. Linsey, D.S. Lumia, and M.A. Maupin, Estimated use of water in the United States in 2000, Reston, VA: U.S. Geological Survey, Circular 1268, 46 pp., 2004.
16. American Wind Energy Association (AWEA), *Wind Energy Fast Facts*, AWEA. <http://www.awea.org/pubs/factsheets/FastFacts2003.pdf> (current May 2004).
17. W. Carter and B. Diong, Model of regenerative fuel cell-supported wind turbine AC power generating system, *Proceedings of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Seattle, WA, October 2004.
18. M.T. Iqbal, Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system, *Renewable Energy*, 28(2), 223–237, 2003.
19. Grainger Center for Electric Machinery and Electromechanics, University of Illinois at Urbana-Champaign, *The 2001 International Future Energy Challenge*. <http://www.energychallenge.org/>.
20. L.-Y. Chiu, B. Diong, and R. Gemmen, An improved small-signal model of the dynamic behavior of PEM fuel cells, To appear in *IEEE Transactions Industry Applications*, 40(4), July/August 2004.
21. W.E. Leithead, S.A. De La Salle, and D. Reardon. Classical control of active pitch regulation of constant speed horizontal axis wind turbine, *International Journal of Control*, 55(4), 845–876, 1992.
22. D.M. Eggleston and F.S. Stoddard, *Wind Turbine Engineering Design*, New York: Kluwer Academic Publishers, 1987.
23. E.W. Weisstein, Euler backward method. From *MathWorld—A Wolfram Web Resource*. <http://mathworld.wolfram.com/EulerBackwardMethod.html> (current May 2004).
24. R. Isermann, *Digital Control Systems*, vol. 2, 2nd ed., Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1989.
25. J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
26. K. Sapru, N.T. Stetson, and S.R. Ovshinsky, Development of a small scale hydrogen production storage system for hydrogen applications, *Proceedings of Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Honolulu, HI, Vols. 3 & 4, 1997.
27. N. Mohan, T.M. Undeland, and W.P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
28. T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, and T. Funabashi, A hybrid power system using alternative energy facilities in isolated Island, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(2), 406–414, June 2005.
29. C. Wang and M.H. Nehrir, Power management of a stand-alone wind/photo-voltaic/fuel cell energy system, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(3), 957–967, 2008.
30. Global Wind 2007 report, Global Wind Energy Council. [Online] <http://www.gwec.net/index.php?id=90>.
31. *Wind Power Today—FederalWind ProgramHighlights*. NREL, DOE/GO-102005-2115, April 2005.
32. *Trends in Photovoltaic Applications: Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2004*, International Energy Agency Photovoltaics Power Systems Programme (IEA PVPS), September 2005.
33. J. Cahill, K. Ritland, and W. Kelly, *Description of Electric Energy Use in Single Family Residences in the PacificNorthwest 1986–1992*, Portland, OR: Office Energy Resour, Bonneville Power Admin, December 1992.

34. <http://www.usbr.gov/pn/agrimet/webaghrread.html>, 2006 [Online].
35. J.H. Teng, Modeling distributed generations in three-phase distribution load flow, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2(3), 330–340, 2008.
36. M.E. Baran and F.F. Wu, Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(1), 735–743, 1989.
37. H. Chiang and M.E. Baran, On the existence and uniqueness of load flow solution for radial distribution power networks, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 37(3), 410–416, 1990.
38. M. Rabinowitz, Power systems of the future, *IEEE Power Engineering Review*, 20(1), 5–16, 2000.
39. S. Persaud, B. Fox, and D. Flynn, Impact of remotely connected wind turbines on steady state operation of radial distribution networks, *IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution*, 147(3), 157–163, 2000.
40. A.E. Feijoo and J. Cidras, Modeling of wind farms in the load flow analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(1), 110–115, 2000.
41. T.H. Chen, M.S. Chen, T. Inoue, P. Kotas, E.A. Chebli, Three-phase cogenerator and transformer models for distribution system analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6(4), 1671–1681, 1991.
42. C.S. Cheng and D. Shirmohammadi, A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(2), 671–679, 1995.
43. J.H. Teng, A direct approach for distribution system load flow solutions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(3), 882–887, 2003.

附录

附录 A 线性控制

A.1 简介

本书是针对汽车和能源工业的工程师、可再生能源电路和控制领域的研究人员和在校研究生的，我们假设读者已经具备以下的基础知识：微分方程、拉普拉斯变换、传递函数、极点和零点以及矩阵代数。此外，我们也希望读者已经读过一门连续时间线性控制系统课程。然而，为了使本书能接触到更多的读者，我们在这个附录中会简要复习一下线性系统和控制。

A.2 线性系统与控制

A.2.1 状态变量和状态方程

一个动态系统的“状态变量”是“最少”的一套变量，通常表示成 $x_1(t)$, $x_2(t)$, $\dots$, $x_n(t)$ 。可以用 n 个一阶线性微分方程来完全描述系统的动态行为：

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + b_{11}u_1 + \dots + b_{1m}u_m \\ \dot{x}_2(t) &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + b_{21}u_1 + \dots + b_{2m}u_m \\ &\vdots \\ \dot{x}_n(t) &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n + b_{n1}u_1 + \dots + b_{nm}u_m\end{aligned}\quad (\text{A-1})$$

式中 $u_i(t)$, $i=1,2,\dots,m$ 代表系统的（控制）“输入”，系数 a 和 b 都是（不随时间变化的）常数。这些一阶线性微分方程就被称为动态系统的“状态方程”。

系统的“输出”，通常表示为 $y(t)$ ，是指那些测量的变量（使用传感器）。如果它们线性地依赖于系统的状态变量和输入，那么它们可以通过数学方程描述为：

$$\begin{aligned}y_1(t) &= c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \dots + c_{1n}x_n + d_{11}u_1 + \dots + d_{1m}u_m \\ y_2(t) &= c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + \dots + c_{2n}x_n + d_{21}u_1 + \dots + d_{2m}u_m \\ &\vdots \\ y_p(t) &= c_{p1}x_1 + c_{p2}x_2 + \dots + c_{pn}x_n + d_{p1}u_1 + \dots + d_{pm}u_m\end{aligned}\quad (\text{A-2})$$

式中 $p \leq n$ ，系数 c 和 d 都是常数。式（A-1）和式（A-2）可以写成更为简洁的向量矩阵形式

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\quad (\text{A-3})$$

式中 $\dot{x}(t)$ 、 $x(t)$ 、 $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别是状态导数、状态变量、输入和输出的 $n \times 1$ 、 $n \times 1$ 、 $m \times 1$ 和 $p \times 1$ 向量。而 A 、 B 、 C 和 D 分别是 $n \times n$ 、 $n \times m$ 、 $p \times n$ 和 $p \times m$ 矩阵。

例：用状态方程描述一个质量-弹簧-阻尼系统。

首先要注意，一个质量-弹簧-阻尼系统的动态行为可以由二阶线性微分方程来完全描述：

$$M\ddot{y}(t) + B\dot{y}(t) + Ky(t) = u(t) \quad (\text{A-4})$$

如图 A-1 所示，其中 $y(t)$ 代表质量 M 在力 $u(t)$ 下的位移， B 和 K 分别是系统的阻尼和弹簧常数。

让我们把两个新的变量 $x_1(t) = y(t)$ 和 $x_2(t) = \dot{y}(t)$ 定义成系统的状态变量。然后，经过一些简单的代数，可以把式 (A-4) 改写成等同的一阶线性微分方程组，来代表质量-弹簧-阻尼系统的二阶状态方程描述：

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= \dot{y}(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= \ddot{y}(t) = -\frac{K}{M}x_1(t) - \frac{B}{M}x_2(t) + \frac{1}{M}u(t)\end{aligned}\quad (\text{A-5})$$

这也可以表示成向量矩阵形式

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{M} & -\frac{B}{M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u \quad (\text{A-6})$$

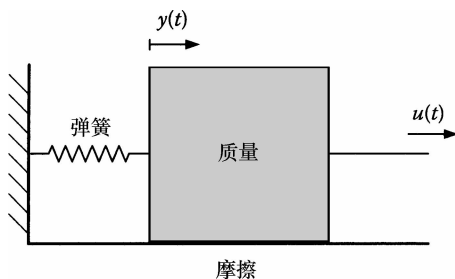


图 A-1 质量-弹簧-阻尼系统

A.2.2 非线性系统的线性近似

一个非线性动态系统可以定义状态变量，用来得到状态方程组。尽管这些方程是非线性的，但它可以描述这个系统的动态性能。然而，假设系统在有限的范围内工作，例如，在一组状态变量和输入值 (x_0, u_0) 定义的工作点或平衡点附近，变量改变不多，我们可以在这个范围内把系统的性能（用电子工程术语称为小信号性能）近似成一组“线性”状态方程。在许多像文献 [1] 这样的本科控制系统教

科书中，我们可以找到这样做的泰勒级数展开标准步骤。在 3.5.1 节中，我们已经用同样的近似方法得到质子交换膜燃料电池的线性模型。

例如一个普通二阶非线性系统的线性近似：

假设有一个二阶动态系统，它的状态变量是 x_1 、 x_2 ，并且只有一个输入 u ，系统可以由非线性状态方程来描述：

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= f_1(x_1, x_2, u) \\ \dot{x}_2(t) &= f_2(x_1, x_2, u)\end{aligned}\quad (\text{A-7})$$

其中 f_1 和 f_2 是非线性函数。如果系统的工作点值是 (x_{10}, x_{20}, u_0) ，那么式 (A-7) 的线性近似是

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= \left. \frac{df_1}{dx_1} \right|_{x_{10}, x_{20}, u_0} x_1 + \left. \frac{df_1}{dx_2} \right|_{x_{10}, x_{20}, u_0} x_2 + \left. \frac{df_1}{du} \right|_{x_{10}, x_{20}, u_0} u \\ \dot{x}_2(t) &= \left. \frac{df_2}{dx_1} \right|_{x_{10}, x_{20}, u_0} x_1 + \left. \frac{df_2}{dx_2} \right|_{x_{10}, x_{20}, u_0} x_2 + \left. \frac{df_2}{du} \right|_{x_{10}, x_{20}, u_0} u\end{aligned}\quad (\text{A-8})$$

请注意，在工作点值计算偏导数，会给出式 (A-8) 中的常系数 x_1 ， x_2 ，和 u 。

A.2.3 线性系统的特征方程、特征根和特征值

对于线性状态方程[式 (A-3)]所描述的动态系统，它的输入、输出“传递函数”可以表示为

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (\text{A-9})$$

式中 s 是拉普拉斯变换的复数频率变量， I 是单位矩阵。此外，系统的“特征根”是 $sI - A$ 等于 0 时的矩阵行列式根 (s 的 n 阶多项式)

$$|sI - A| = 0 \quad (\text{A-10})$$

这些 n 个根也是系统的“极点” (受系统零的精确取消影响)，换个方法，我们可以通过寻找系统矩阵 A 的“特征值”得到。

A.2.4 线性状态反馈控制

我们考虑一个状态方程[式 (A-3)]描述的线性动态系统，它的控制有以下形式

$$u(t) = -Kx(t) \quad (\text{A-11})$$

式中状态反馈增益 K 是一个有常数元素的向量 (或在多输入情况下的矩阵)。这种形式的控制意味着：

- 1) 所有的状态变量是可测量的，而且也被测量了；
- 2) 控制是状态变量的一个线性组合；
- 3) 包括方程式 (A-3) 和式 (A-11) 的闭环控制系统现在可以描述成

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) \quad (\text{A-12})$$

- 4) 这个闭环系统的特征方程给出如下

$$|sI - (A - BK)| = 0$$

现在, 如果矩阵对 (A, B) 能使开环系统[式(A-3)]成为完全状态控制的^[1], 那么通过适当选择元素 K , 闭环系统的特征根可以被“放置”在复数 s -平面的任何地方 (只要复根是共轭对)。这种状态反馈增益的设计步骤通常称为“极点配置”设计。

例如一个普通二阶系统的状态反馈极点设置:

假设我们有一个由状态方程描述的动态系统

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u \quad (\text{A-13})$$

这个系统的特征方程给出如下:

$$s^2 + a_1 s + a_0 = 0 \quad (\text{A-14})$$

有两个特征值 (极点) 可能在不需要的位置上, 例如, 在右半 s -平面, 对应于一个不稳定的系统。因为 (A, B) 是这个系统的完全可控矩阵对, 所以可以使用状态反馈控制, 把闭环系统的极点放置在任何其他位置上。然而我们必须使测量的输出

$$y(t) = x(t)$$

然后, $K = (k_0 \ k_1)$ 给出需要的状态反馈增益, 这意味着, 在状态反馈控制下的系统可以描述成

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -[a_0 + k_0] & -[a_1 + k_1] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (\text{A-15})$$

这就得出了特征方程

$$s^2 + (a_1 + k_1)s + (a_0 + k_0) = 0 \quad (\text{A-16})$$

因此, 可以适当选择 K 元素来得到所需的特征方程。这对应着闭环系统的极点放置在能产生预期系统稳定性和性能特点的位置上。

附录 B 非线性控制

在自然界, 几乎所有的系统都是非线性的, 例如燃料电池系统、电网等等。线性控制是把系统模拟成线性化, 这实际上只有在线性的工作点才是准确的。为了达到更好的控制性能, 需要考虑使用非线性模拟和非线性控制。在前面第三章已经讲到燃料系统的非线性模拟, 这个附录将初步介绍非线性控制技术, 特别是精确线性化方法^[2-4]。

B.1 非线性坐标变换和微分同胚映射

对于给定的一组非线性方程

$$Z = \Phi(X) \quad (\text{B-1})$$

式中 Z 和 X 是有 $(n \times 1)$ 维的向量, Φ 是一个有 $(n \times 1)$ 维的非线性向量函数。如果满足以下两个条件, 在式 (B-1) 中的非线性变换集合就被称为非线性坐标变换:

1) Φ 的逆变换存在, 这也意味着 Φ 存在;

2) Φ 和 Φ^{-1} 都是光滑向量函数, 即 Φ 和 Φ^{-1} 函数组成部分的任何阶偏导数都是连续的。

如果满足以上两个条件, 坐标变换 $\Phi(X)$ 也被称为两个坐标空间之间的微分同胚映射。从几何角度来看, 坐标变换 $Z = \Phi(X)$ 和 $X = \Phi^{-1}(Z)$ 可以被看成是有同样 X 和 Z 的两个空间之间的投影。

B.2 局部微分同胚映射

上述两个条件可能仅在一个具体的 X 点附近满足, 而不是在空间的所有点。局部微分同胚映射只是定义在某一个区域。

下面是局部微分同胚映射的性质:

假设 $\Phi(X)$ 是定义在空间 R^n 某个子集 S 的一个光滑函数。如果雅可比矩阵 $\partial\Phi/\partial X$ 在 $X = X^0$ 点是非奇异性的, 那么 $\Phi(X)$ 在包括 X^0 的一个开放子集 S^0 里是局部微分同胚映射。

B.3 非线性控制系统的坐标变换

给定一个非线性控制系统

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X) + g(X)u \\ y = h(X) \end{cases} \quad (\text{B-2})$$

式中 $X \in R^n$ 和 $u \in R$ ——状态变量和控制变量;

$y \in R$ ——输出变量;

f 和 g ——非线性函数向量;

h ——非线性函数。

选择一个局部微分同胚映射 $Z = \Phi(X)$, 然后考虑式 (B-2), 我们有

$$\dot{Z} = \frac{d\Phi}{dX} = \frac{\partial\Phi}{\partial X} \frac{dX}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial X} \dot{X} = \frac{\partial\Phi}{\partial X} (f(X) + g(X)u)$$

并考虑 $X = \Phi^{-1}(Z)$, 因此得到

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= \frac{\partial\Phi}{\partial X} [f(X) + g(X)u] = \frac{\partial\Phi}{\partial X} [f(\Phi^{-1}(Z)) + g(\Phi^{-1}(Z))u] \\ y &= h(X) = h(\Phi^{-1}(Z)) \end{aligned}$$

定义

$$\begin{aligned}\tilde{f}(Z) &= \frac{\partial \Phi}{\partial X} f(X) \Big|_{X=\Phi^{-1}(Z)} \\ \tilde{g}(Z) &= \frac{\partial \Phi}{\partial X} g(X) \Big|_{X=\Phi^{-1}(Z)} \\ \tilde{h}(Z) &= h(X) \Big|_{X=\Phi^{-1}(Z)}\end{aligned}$$

然后得到

$$\begin{aligned}\dot{Z} &= \tilde{f}(Z) + \tilde{g}(Z)u \\ y &= \tilde{h}(Z)\end{aligned}\tag{B-3}$$

式 (B-3) 代表选定局部微分同胚映射变换的非线性系统。

B.4 仿射非线性控制系统

一个控制系统如果对状态变量向量是非线性的, 但对控制变量向量是线性的, 这个系统就称为仿射非线性控制系统。它有如下的格式:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= f(X) + \sum_{i=1}^m g_i(X)u_i \\ y &= h(X)\end{aligned}$$

式中 $X \in R^n$ 和 $u \in R$ ——状态变量向量和控制变量向量;

$y \in R$ ——输出变量;

f 和 g ——非线性函数向量;

h ——非线性函数。

非线性函数向量 $f(X)$ 和 $g(X)$ 也称为状态空间的向量场。

B.5 向量场的导出映射

向量场的导出映射对精确线性化技术非常重要的。下面是它的定义: 对于一个给定的微分同胚映射 $Z = \Phi(X)$ 和一个向量场 $f(X)$, $\Phi(X)$ 的雅可比矩阵是 $J_\Phi = (\partial \Phi / \partial X)$, 那么在映射 $\Phi(X)$ 下的导出映射 $f(X)$ 定义为

$$\Phi_*(f) = J_\Phi(X)f(X) \Big|_{X=\Phi^{-1}(Z)}$$

向量场 $f(X)$ 的导出映射是根据微分同胚映射 $Z = \Phi(X)$, 从状态空间到 Z 空间移动向量场 $f(X)$ 的变换。

B.6 李导数和李括号

非线性系统两个基本的几何概念是李导数和李括号, 它们被用在精确线性化技术中。

B.6.1 李导数

给定一个可微分的标量函数 $\xi(X) = \xi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和一个 X 的向量场 $f(X)$, 通过下面的运算, 可以得到一个新的标量函数 $L_f \xi(X)$,

$$L_f \xi(X) = \frac{\partial \xi(X)}{\partial X} f(X) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \xi(X)}{\partial x_i} f_i(X)$$

称为函数 $\xi(X)$ 沿着向量场 $f(X)$ 的李导数。

B.6.2 李括号

假设有两个向量场函数 $f(X)$ 和 $g(X)$ 。 $g(X)$ 沿 $f(X)$ 的李括号由如下计算定义:

$$[f, g] = \text{ad}_f g = \frac{\partial g}{\partial X} f - \frac{\partial f}{\partial X} g$$

由于 $g(X)$ 的李括号是一个新的向量场, 它可以再一次用来计算沿 $f(X)$ 的李括号:

$$\text{ad}_f^2 g(X) = [f, [f, g]](X)$$

...

$$\text{ad}_f^k g(X) = [f, \text{ad}_f^{k-1} g](X)$$

李括号的主要计算规则是

1) 李括号是反对称的:

$$[f, g] = -[g, f]$$

2) 如果 λ_1 和 λ_2 是两个实数, 那么

$$[f, \lambda_1 g_1 + \lambda_2 g_2](X) = \lambda_1 [f, g_1](X) + \lambda_2 [f, g_2](X)$$

3) 如果 $\gamma(X)$ 是另一个向量场, 那么

$$[f, [g, \gamma]] + [\gamma, [f, g]] + [g, [\gamma, f]] = 0$$

4) 如果 $f(X)$ 和 $g(X)$ 是向量场, $\xi(X)$ 是标量函数, 那么 $\xi(X)$ 沿向量场 $[f(X), g(X)]$ 的李导数是

$$\dot{\xi} = \frac{d\Phi}{dX} = \frac{\partial \Phi}{\partial X} \frac{dX}{dt} = \frac{\partial \Phi}{\partial X} \dot{X} = \frac{\partial \Phi}{\partial X} (f(X) + g(X)u)$$

B.7 向量场集的对合性

假设 k 个向量场 $g_1(X), \dots, g_n(X)$, 所有都是 n 维的, 我们可以组成矩阵:

$$G = [g_1(X) g_2(X) \cdots g_k(X)]$$

如果矩阵 G 在 $X = X^0$ 有阶 k , 并且下面的增广矩阵

$$[g_1(X) g_2(X) \cdots g_k(X) [g_i, g_j]]$$

在 $X = X^0$ 对任何 $1 \leq i, j \leq k$ 的 i 和 j 有同样的阶, 那么向量场集合 $\{g_1, g_2, \dots, g_k\}$ 称为对合集合, 或者我们说它有对合性。

B.8 一个控制系统的相关度

假设一个单输入、单输出的非线性控制系统：

$$\begin{aligned}\dot{X} &= f(X) + g(X)u \\ y &= h(X)\end{aligned}$$

式中 $X \in R^n$, $u \in R$, $y \in R$, $f(X)$ 和 $g(X)$ 是向量场项, 如果满足下面两个条件, 以上系统在 $X = X^0$ 的邻域 Ω 有相关度 γ :

1) 函数 $L_f^k h(X)$ 沿 g 的李导数在 Ω 等于零, 即

$$L_g L_f^k h(X) = 0, \quad \kappa < \gamma - 1, \quad \forall x \in \Omega$$

2) 函数 $L_f^{\gamma-1} h(X)$ 沿向量场 $g(X)$ 的李导数在 Ω 处不等于零, 即

$$L_g L_f^{\gamma-1} h(X) \neq 0$$

B.9 精确线性化控制

精确线性化控制设计原则, 是把一个非线性控制系统精确线性化成一个可控的线性系统, 并根据线性控制系统, 得到状态的非线性反馈控制律; 把得到的控制律转换回原有的非线性空间, 就会得到原控制系统的非线性控制设计。

B.9.1 精确线性化的条件

为了引进精确线性化的条件, 我们需要介绍下面的定理:

Frobenius 定理

考虑下面的偏微分方程组:

$$\frac{\partial h(X)}{\partial X} [Y_1(X) Y_2(X) \cdots Y_k(X)] = 0 \quad (\text{B-4})$$

式中 $\partial h(X)/\partial X$ 是 $h(X)$ 的梯度向量; $[Y_1(X) Y_2(X) \cdots Y_k(X)]$ 是在 X 空间定义的 n 维向量场。

假设矩阵 $[Y_1(X) Y_2(X) \cdots Y_k(X)]$ 在 $X = X^0$ 有阶 k 。当且仅当增广矩阵 $[Y_1(X) Y_2(X) \cdots Y_k(X) [Y_i, Y_j]]$ 在 X^0 邻域对所有的 X 仍有阶 k 时, 在 X^0 的 Ω 邻域一定存在式 (B-4) 的 $n-k$ 个标量函数解, 使雅可比矩阵 $\partial h(X)/\partial X$ 在 $X = X^0$ 有阶 $n-k$ 。

Frobenius 定理提出的条件实际上是向量场 $[Y_1, Y_2, \dots, Y_k]$ 对合性的条件。

B.9.2 通过精确线性化的非线性控制设计

考虑如下一个单输入、单输出 n 阶非线性控制系统:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= f(X) + g(X)u \\ y &= h(X)\end{aligned} \quad (\text{B-5})$$

我们假设系统的相关度是 $r = n$, 那么这个系统可以被变换成一个可控的线性系统

$$\dot{Z} = AZ + Bv \quad (\text{B-6})$$

其中矩阵 A 和 B 是 Brunovsky 标准形式, Z 和 v 分别是状态变量向量和控制变量。

利用非线性状态反馈, 可以产生线性化:

$$u = -\frac{\alpha(X)}{\beta(X)} + \frac{1}{\beta(X)}v \quad (\text{B-7})$$

式中

$$\begin{aligned}\alpha(X) &= L_f^n h(X) \\ \beta(X) &= L_g L_f^{n-1} h(X)\end{aligned}$$

而且微分同胚坐标变换:

$$Z = \Phi(X) = \begin{bmatrix} h(X) \\ L_f h(X) \\ \vdots \\ L_f^{n-1} h(X) \end{bmatrix} \quad (\text{B-8})$$

在式 (B-6) 中, 线性系统最优控制是

$$v^* = -B^T P^* Z(t)$$

其中 P^* 是 Riccati 矩阵方程的解。

考虑到坐标变换 $Z = \Phi(X)$, 我们可以得到以下的非线性控制律:

$$u = \frac{-(L_f^n h(X) + k_n^* L_f^{n-1} h(X) + \cdots + k_2^* L_f h(X) + k_1^* h(X))}{L_g L_f^{n-1} h(X)}$$

Brunovsky 标准形式给出如下:

$$\dot{Z} = AZ + Bv$$

式中 $Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

附录 C 燃料电池汽车应用的感应式电动机建模和向量控制

C.1 感应式电动机的电压方程

图 C-1 所示是理想化的感应式电动机。

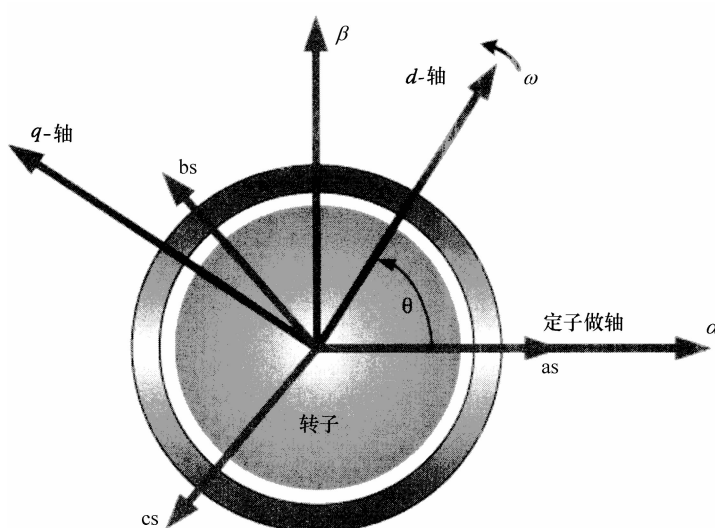


图 C-1 理想化的感应式电动机

(出自 from Liu, J., *Modeling, analysis and design of integrated starter generator system based on field oriented controlled induction machines*, PhD thesis, Ohio State University, Columbus, OH, 2005.)

如果定子绕组是正弦分布的，那么定子和转子的电压方程式可以表达如下^[6]：

$$V_{abcs} = R_s i_{abcs} + p \bar{\lambda}_{abcs} \quad (C-1)$$

$$V_{abcr} = R_r i_{abcr} + p \bar{\lambda}_{abcr}$$

式中， $p = d/dt$ ， $V_{abcs} = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T$ ， $i_{abcs} = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T$ ， $\bar{\lambda}_{abcs} = [\lambda_{as} \ \lambda_{bs} \ \lambda_{cs}]^T$ ， $V_{abcr} = [V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^T$ ， $i_{abcr} = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T$ ，并且 $\bar{\lambda}_{abcr} = [\lambda_{ar} \ \lambda_{br} \ \lambda_{cr}]^T$ 。

下标 s 和 r 分别代表定子和转子绕组方程。

磁通量方程给出如下：

$$\begin{bmatrix} \bar{\lambda}_{abcs} \\ \bar{\lambda}_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{sr}^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (C-2)$$

式中

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{1s} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{1s} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{1s} + L_{ms} \end{bmatrix}, \quad L_r = \begin{bmatrix} L_{1r} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{1r} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{1r} + L_{mr} \end{bmatrix},$$

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix}$$

式中 L_{ms} ——定子磁化电感;
 L_{mr} ——转子磁化电感;
 L_{ls} ——定子漏电感;
 L_{lr} ——转子漏电感;
 L_{sr} ——定子与转子绕组之间的互感。

C.2 在固定参照系中的电压方程

使用参考系理论（附录 D），只要满足条件 $f_a + f_b + f_c = 0$ (f_a 、 f_b 和 f_c 是每个相 v 、 i 和 λ 的组成)，就可以把感应式电动机变量（电压、电流和磁链）变换到另一个参照系。使用 Park 变换，这三个相可以在固定参考系改变为

$$f_s^s = f_{ds}^s + j f_{qs}^s = 2/3 (f_a + f_b e^{j2\pi/3} + f_c e^{j4\pi/3}) \quad (C-3)$$

或者等效为

$$\begin{bmatrix} f_{ds}^s \\ f_{qs}^s \end{bmatrix} = 2/3 \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (C-4)$$

我们可以把定子和转子电压方程简单地写成

$$\text{定子电压方程: } v_s^s = R_s i_s^s + p \lambda_s^s \quad (C-5)$$

$$\text{转子电压方程: } v_r^r = R_r i_r^r + p \lambda_r^r \quad (C-6)$$

假设固定和同步参照系之间存在关系：

$$f_r^s = e^{j\theta_r} \cdot f_r^r \quad (C-7)$$

式中 $\theta_r = \omega_r t$ 是固定和同步参考系之间的相差角。

$$v_r^r = R_r i_r^r + p \lambda_r^r \quad (C-8)$$

$$v_r^s e^{-j\theta_r} = R_r i_r^s e^{-j\theta_r} + p (\lambda_r^s e^{-j\theta_r})$$

$$\begin{aligned}
&= R_r i_r^s e^{-j\theta_r} + p(\lambda_r^s e^{-j\theta_r}) \\
&= R_r i_r^s e^{-j\theta_r} + e^{-j\theta_r} p \lambda_r^s - p(e^{-j\theta_r}) \lambda_r^s \\
&= R_r i_r^s e^{-j\theta_r} + e^{-j\theta_r} p \lambda_r^s - \omega_r e^{-j\theta_r} \lambda_r^s \\
\Rightarrow v_r^s &= R_r i_r^s + (p - j\omega_r) \lambda_r^s
\end{aligned} \tag{C-9}$$

因此，在固定参考系中的电压方程是

$$\text{定子电压方程: } v_s^s = R_s i_s^s + p \lambda_s^s \tag{C-10}$$

$$\text{转子电压方程: } v_r^s = R_r i_r^s + (p - j\omega) \lambda_r^s \tag{C-11}$$

C.3 在同步参考系中的电压方程

$$\begin{aligned}
\lambda_s^s &= L_s i_s^s + L_m i_r^s \\
\lambda_r^s &= L_r i_r^s + L_m i_s^s
\end{aligned} \tag{C-12}$$

式中， L_s 是定子自感； L_m 是互感； L_r 是转子自感。

通过把式 (C-12) 代入式 (C-10) 和式 (C-11)，可以推导固定参考系的 d - q 模型电压方程：

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & L_m p \\ L_m p & \omega_r L_m & R_r + L_r p & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & L_m p & -\omega_r L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \tag{C-13}$$

在固定系中的电压方程可以用下面的关系在同步系中变换：

$$\begin{aligned}
f_s^e &= e^{-j\theta_e} f_s^s \\
f_r^e &= e^{-j\theta_e} f_r^s
\end{aligned} \tag{C-14}$$

式中 θ_e 是同步角速度。

定子电压方程变成

$$\begin{aligned}
v_s^s &= R_s i_s^s + p \lambda_s^s \\
e^{j\theta_e} v_s^e &= R_s i_s^e e^{j\theta_e} + p(e^{j\theta_e} \lambda_s^e) \\
&= R_s i_s^e e^{j\theta_e} + j\omega_e e^{j\theta_e} \lambda_s^e + e^{j\theta_e} p \lambda_s^e \\
\Rightarrow v_s^e &= R_s i_s^e + (p + j\omega_e) \lambda_s^e
\end{aligned} \tag{C-15}$$

转子电压方程变成

$$\begin{aligned}
v_r^s &= R_r i_r^s + (p - j\omega_r) \lambda_r^s \\
e^{j\theta_e} v_r^e &= R_r i_r^e e^{j\theta_e} + (p - j\omega_r) (\lambda_r^e e^{j\theta_e}) \\
&= R_r i_r^e e^{j\theta_e} + (p + j\omega_e - j\omega_r) \lambda_r^e e^{j\theta_e} \\
\Rightarrow v_r^e &= \lambda_r^e R_r i_r^e + (p + j(\omega_e - \omega_r)) \lambda_r^e \\
&= R_r i_r^e + (p + j\omega_{sl}) \lambda_r^e
\end{aligned} \tag{C-16}$$

式中转差速率定义成

$$\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r \tag{C-17}$$

磁链方程可以表达为

$$\begin{aligned}\lambda_s^e &= L_s i_s^e + L_m i_r^e \\ \lambda_r^e &= L_r i_r^e + L_m i_s^e\end{aligned}\quad (C-18)$$

由式 (C-16) 和式 (C-17)，可以用电流、电阻、电抗和速度来描述电压方程：

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \\ v_{dr}^e \\ v_{qr}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -\omega_e L_s & L_m p & -\omega_e L_m \\ \omega_e L_m & R_s + L_s p & \omega_e L_m & L_m p \\ L_m p & -\omega_{sl} L_m & R_r + L_r p & -\omega_{sl} L_r \\ \omega_{sl} L_m & L_m p & \omega_{sl} L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ i_{dr}^e \\ i_{qr}^e \end{bmatrix}\quad (C-19)$$

C.4 d-q 等效电路

图 C-2 是任意坐标系的等效电路。按照在参考系中的转子转速 ω 定义，我们可以在不同参照系中得到动态 d-q 模型。当参考系转速为零 ($\omega = 0$) 时，可以得到静止参考系中的动态 d-q 模型；当参考系的转速是同步转速 ($\omega = \omega_e$) 时，可以得到同步旋转坐标系中的动态 d-q 模型。

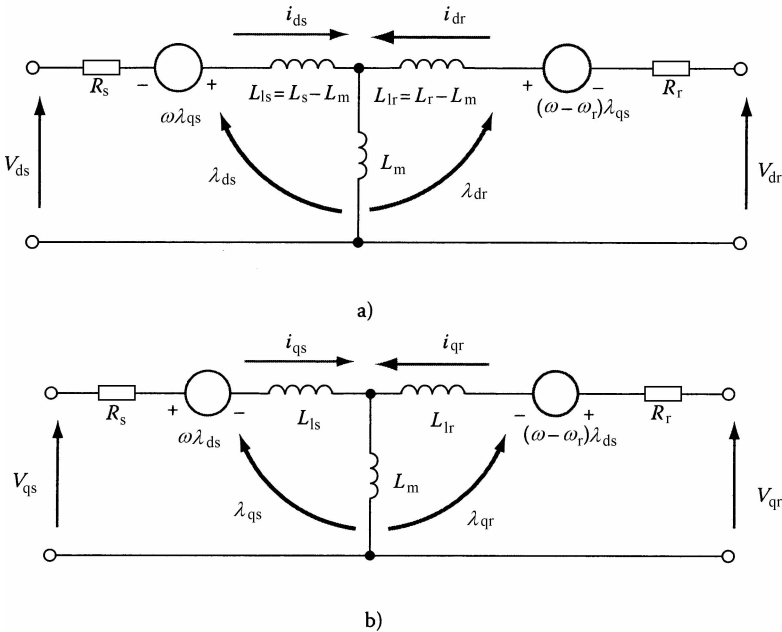


图 C-2 动态 d-q 等效电路

(出自 Liu, J., *Modeling, analysis and design of integrated starter generator system based on field oriented controlled induction machines*, PhD thesis,

Ohio State University, Columbus, OH, 2005.)

a) d-轴等效电路 b) q-轴等效电路

C.5 状态空间形式的动态感应式电动机模型

为了得到感应式电动机的状态空间方程，让我们考虑：

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ds}^e \\ \dot{i}_{qs}^e \\ \lambda_{dr}^e \\ \lambda_{qr}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ i_{dr}^e \\ i_{qr}^e \end{bmatrix} \quad (\text{C-20})$$

通过反演方程[式(C-20)]，可以得到下面的方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ds}^e \\ \dot{i}_{qs}^e \\ \dot{i}_{dr}^e \\ \dot{i}_{qr}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -L_m/L_r & 0 & 1/L_r & 0 \\ 0 & -L_m/L_r & 0 & 1/L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ \lambda_{dr}^e \\ \lambda_{qr}^e \end{bmatrix} \quad (\text{C-21})$$

把式(C-21)代入式(C-18)，新的电压方程可以写成：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \\ v_{dr}^e \\ v_{qr}^e \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & -\sigma\omega_e L_s & 0 & -\omega_e L_m/L_s \\ -\sigma\omega_e L_s & R_s & \omega_e L_m/L_s & 0 \\ -L_m R_r/L_r & 0 & R_r/L_r & -\omega_{sl} \\ 0 & -L_m R_r/L_r & \omega_{sl} & R_r/L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ \lambda_{dr}^e \\ \lambda_{qr}^e \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \sigma L_s & 0 & L_m/L_r & 0 \\ 0 & \sigma L_s & 0 & L_m/L_r \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ \lambda_{dr}^e \\ \lambda_{qr}^e \end{bmatrix} \quad (\text{C-22}) \end{aligned}$$

式中 $\sigma = 1 - (L_m^2/L_s L_r)$ 。

如果定义

$$A = \begin{bmatrix} R_s & -\sigma\omega_e L_s & 0 & -\omega_e L_m/L_s \\ -\sigma\omega_e L_s & R_s & \omega_e L_m/L_s & 0 \\ -L_m R_r/L_r & 0 & R_r/L_r & -\omega_{sl} \\ 0 & -L_m R_r/L_r & \omega_{sl} & R_r/L_r \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \sigma L_s & 0 & L_m/L_r & 0 \\ 0 & \sigma L_s & 0 & L_m/L_r \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可以使用上面的定义来得到状态空间方程：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ \lambda_{dr}^e \\ \lambda_{qr}^e \end{bmatrix} = -B^{-1}A \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ \lambda_{dr}^e \\ \lambda_{qr}^e \end{bmatrix} + B^{-1} \begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \\ v_{dr}^e \\ v_{qr}^e \end{bmatrix} \quad (C-23)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ \lambda_{dr}^e \\ \lambda_{qr}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{L_m^2}{\sigma L_s T_r L_r}\right) & \omega_e & \frac{K}{T_r} & \omega_r K \\ -\omega_e & -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{L_m^2}{\sigma L_s T_r L_r}\right) & -\omega_r K & \frac{K}{T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_{s1} \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -\omega_{s1} & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ \lambda_{dr}^e \\ \lambda_{qr}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \end{bmatrix} \quad (C-24)$$

式中 $K = L_m / \sigma L_s L_r$ ，而且 $T_r = L_r / R_r$ 。

C.6 转矩方程

为了推导转矩方程，让我们先考虑下面的电压方程：

$$v = Ri + Lp i + G_m i \quad (C-25)$$

式中

$$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}; \quad v = \begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$G_m = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e L_s & 0 & -\omega_e L_s \\ \omega_e L_s & 0 & \omega_e L_m & 0 \\ 0 & -(\omega_e - \omega_r) L_m & 0 & -(\omega_e - \omega_r) L_r \\ (\omega_e - \omega_r) L_m & 0 & (\omega_e - \omega_r) L_r & 0 \end{bmatrix}; \quad i = \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ i_{dr}^e \\ i_{qr}^e \end{bmatrix}$$

把电压方程两边同时乘以 $1.5i^T$ ，可以得到下面的功率方程：

$$P = 1.5i^T v = 1.5(i^T Ri + i^T Lpi + i^T G_m i) \quad (C-26)$$

在式 (C-26) 中，项 $1.5i^T v$ 是电动机输入功率，项 $1.5i^T Ri$ 是铜损耗，项 $1.5i^T Lpi$ 代表绕组之间的磁场能量交换率，项 $1.5i^T G_m i$ 代表机械能转换速率。因此，机械功率可以定义为

$$\begin{aligned} P_m &= 1.5i^T G_m i = 1.5(i^T \omega_r G_e i + i^T \omega_r G_r i) \\ &= 1.5i^T \omega_r G_r i \end{aligned} \quad (C-27)$$

式中

$$G_e = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -L_m \\ L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & -L_r \\ -L_m & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}, G_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_r \\ L_m & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}$$

由于 G_e 是反对称的 ($G_e^T = -G_e$)，在计算机械功率 P_m 时，我们不考虑 $i^T \omega_r G_e i$ 。

用功率除以机械速度可以得到转矩：

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{P_m}{\omega_m} = 1.5 \frac{P}{2} i^T G_r i = 1.5 \frac{P}{2} L_m (i_{qs}^e i_{dr}^e - i_{ds}^e i_{qr}^e) \\ &= 1.5 \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (i_{qs}^e \lambda_{dr}^e - i_{ds}^e \lambda_{qr}^e) \end{aligned} \quad (C-28)$$

式中 P 是电动机的极点。

在 d - q 系中的功率是

$$\begin{aligned} P_{dq} &= v_{ds}^s i_{ds}^s + v_{qs}^s i_{qs}^s = \begin{bmatrix} v_{ds}^s & v_{qs}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \\ &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} v_a & v_b & v_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \\ &= \frac{2}{3} (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) \\ &= \frac{2}{3} P_{abc} \end{aligned}$$

然后我们得到

$$P_{abc} = \frac{3}{2} P_{dq} \quad (C-29)$$

C.7 转差率计算

在式 (C-22) 中第四行是

$$p\lambda_{qr}^e = -\frac{1}{T_r}\lambda_{qr}^e + \frac{L_m}{T_r}\dot{i}_{qs}^e - \omega_{sl}\lambda_{qr}^e \quad (\text{C-30})$$

对于磁场定向控制或向量控制, I_{ds} 与转子磁通对齐, I_{qs} 负责产生转矩。 I_{ds} 与 I_{qs} 垂直, 这样像直流电动机一样, 可以分别控制磁通和转矩。因为转子磁链只与 d -轴对齐, 所以向量控制条件是 $\lambda_{qr}^e = 0$ 。在式 (C-24) 中, $p\lambda_{qr}^e = 0$ 。式 (C-25) 可以改写成

$$\begin{aligned} \omega_{sl}\lambda_{dr}^e &= \frac{L_m}{T_r}\dot{i}_{qs}^e \\ \Rightarrow \omega_{sl} &= \frac{L_m}{T_r}\frac{\dot{i}_{qs}^e}{\lambda_{dr}^e} \end{aligned} \quad (\text{C-31})$$

C.8 在 d -轴转子磁通 λ_{dr}^e 的计算

式 (C-22) 的第三行是

$$p\lambda_{dr}^e = -\frac{1}{T_r}\lambda_{dr}^e + \frac{L_m}{T_r}\dot{i}_{ds}^e + \omega_{sl}\lambda_{qr}^e \quad (\text{C-32})$$

考虑到向量控制条件 ($\lambda_{qr}^e = 0$), 式 (C-32) 可以改写成

$$\begin{aligned} p\lambda_{dr}^e + \frac{1}{T_r}\lambda_{dr}^e &= \frac{L_m}{T_r}\dot{i}_{ds}^e \\ \Rightarrow \lambda_{dr}^e &= \frac{L_m}{1 + T_r p}\dot{i}_{ds}^e \end{aligned} \quad (\text{C-33})$$

利用稳态条件, 式 (C-33) 可以改写成

$$\dot{i}_{ds}^e = \frac{\lambda_{dr}^e}{L_m} \quad (\text{C-34})$$

这意味着 i_{ds}^e 控制转子磁链。

C.9 转矩的计算

由于 $\lambda_{qr}^e = 0$, 转矩方程式 (C-28) 变为

$$T_e = 1.5 \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} \dot{i}_{qs}^e \lambda_{dr}^e \quad (\text{C-35})$$

根据转子磁通恒定的向量控制条件, i_{qs}^e 控制电磁转矩。

C.10 d - q 解耦控制与反电动势补偿控制

根据向量控制条件, $\lambda_{qr}^e = 0$, 从式 (C-24) 的第一和第二行, 可以推导出其中有耦合项的电压方程。

$$\begin{aligned} v_{ds}^e &= (R_s + \sigma L_s p) i_{ds}^e - \sigma L_s \omega_e i_{qs}^e \\ v_{qs}^e &= (R_s + \sigma L_s p) i_{qs}^e + \sigma L_s \omega_e i_{ds}^e + \omega_e \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e \end{aligned} \quad (\text{C-36})$$

电压[式 (C-36)]有耦合项 ($\sigma L_s \omega_e i_{qs}^e$ 和 $\sigma L_s \omega_e i_{ds}^e$) 和反电动势项 ($\omega_e (L_m/L_r) \lambda$)。这些耦合项和反电动势项必须用称为反电动势补偿控制的解耦控制来控制。否则, 由于这些耦合项, 这个向量控制不能分别控制 i_q 和 i_d 。新的去耦电压方程是

$$\begin{aligned} \bar{v}_{ds}^e &= v_{ds}^e + \sigma L_s \omega_e i_{qs}^e \\ \bar{v}_{qs}^e &= v_{qs}^e - \sigma L_s \omega_e i_{ds}^e \end{aligned} \quad (\text{C-37})$$

使用式 (C-37), 可以推导式 (C-38):

$$\begin{aligned} \bar{v}_{ds}^e &= (R_s + \sigma L_s p) i_{ds}^e \\ \bar{v}_{qs}^e &= (R_s + \sigma L_s p) i_{qs}^e + \omega_e \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e \end{aligned} \quad (\text{C-38})$$

为了补偿反电动势项 $\omega_e (L_m/L_r) \lambda$, 我们把 $-\omega_e (L_m/L_r) \lambda$ 加到 $\bar{v}_{qs}^e$ 。因此, 新的补偿电压变成

$$\hat{v}_{qs}^e = \bar{v}_{qs}^e - \omega_e \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e \quad (\text{C-39})$$

最后, 解耦了耦合项, 并且补偿了反电动势的新电流方程, 可以写为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_{ds}^e &= -\frac{R_s}{\sigma L_s} i_{ds}^e + \frac{1}{\sigma L_s} \bar{v}_{ds}^e \\ \frac{d}{dt} i_{qs}^e &= -\frac{R_s}{\sigma L_s} i_{qs}^e + \frac{1}{\sigma L_s} \bar{v}_{qs}^e \end{aligned} \quad (\text{C-40})$$

附录 D 坐标变换

D.1 从 abc 相到 $qd0$ 参考坐标系的变换

$$f_{qd0} = \begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = T f_{abc} = T \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_o \end{bmatrix}$$

(D-1)

式中

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \gamma) & \cos(\theta + \gamma) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \gamma) & \sin(\theta + \gamma) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}; \gamma = \frac{2\pi}{3}$$

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \gamma) & \sin(\theta - \gamma) & 1 \\ \cos(\theta + \gamma) & \sin(\theta + \gamma) & 1 \end{bmatrix}; \theta \text{ 为任意角}$$

D.2 同步参考坐标系

假设 q -轴按着同步速度 $\omega_e = 2\pi f_e$ 转动, q -轴和 a -轴的相角差是

$$\theta = \theta_e = \omega_e t$$

(D-2)

图 D-1 所示是相角差。

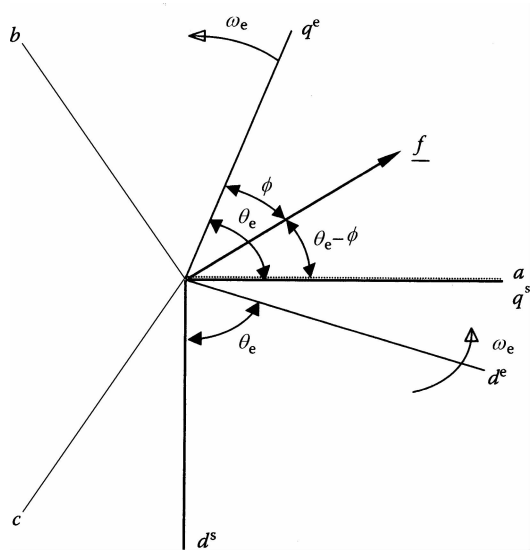


图 D-1 abc -轴和 dq -轴之间的空间向量

(出自 Na, W. , A study on the output voltage control strategies of 3-phase PWM inverter for an uninterruptible power supply, Korea master thesis, Kwangwoon University, Seoul, 1997. 许可使用)

使用式 (D-1)，同步参考坐标系 q -轴和 a -轴是

$$\begin{aligned} f_q^e &= \frac{2}{3} [(f_a + f_b \cos \gamma + f_c \cos \gamma) \cos \theta_e + (f_b \sin \gamma - f_c \sin \gamma) \sin \theta_e] \\ &= \frac{2}{3} \left(f_a - \frac{1}{2} f_b - \frac{1}{2} f_c \right) \cos \theta_e + \frac{1}{\sqrt{3}} (f_b - f_c) \sin \theta_e \end{aligned} \quad (\text{D-3})$$

$$\begin{aligned} f_d^e &= \frac{2}{3} [(f_a + f_b \cos \gamma + f_c \cos \gamma) \sin \theta_e + (-f_b \sin \gamma + f_c \sin \gamma) \cos \theta_e] \\ &= \frac{2}{3} \left(f_a - \frac{1}{2} f_b - \frac{1}{2} f_c \right) \sin \theta_e - \frac{1}{\sqrt{3}} (f_b - f_c) \cos \theta_e \end{aligned} \quad (\text{D-4})$$

只要满足条件 $f_a + f_b + f_c = 0$ ，式 (D-3) 和式 (D-4) 就可以分别变换成有两个变量的式 (D-5) 和式 (D-6)，

$$\begin{aligned} f_q^e &= f_a \cos \theta_e + \frac{1}{\sqrt{3}} (f_b - f_c) \sin \theta_e \\ &= f_a \cos \theta_e + \frac{1}{\sqrt{3}} (f_a + 2f_b) \sin \theta_e \end{aligned} \quad (\text{D-5})$$

$$\begin{aligned} f_d^e &= f_a \sin \theta_e - \frac{1}{\sqrt{3}} (f_b - f_c) \cos \theta_e \\ &= f_a \sin \theta_e - \frac{1}{\sqrt{3}} (f_a + 2f_b) \sin \theta_e \end{aligned} \quad (\text{D-6})$$

D.3 静止参考坐标系

假设 q -轴与 a -轴对齐 ($\theta = 0$)，同步坐标系 q -轴和 d -轴是

$$\begin{aligned} f_q^e &= \frac{2}{3} (f_a + f_b \cos \gamma + f_c \cos \gamma) \\ &= \frac{2}{3} \left(f_a - \frac{1}{2} f_b - \frac{1}{2} f_c \right) \end{aligned} \quad (\text{D-7})$$

$$\begin{aligned} f_d^e &= \frac{2}{3} (-f_b \sin \gamma + f_c \sin \gamma) \\ &= -\frac{1}{\sqrt{3}} (f_b - f_c) \end{aligned} \quad (\text{D-8})$$

因为条件 $f_a + f_b + f_c = 0$ ，我们可以得到

$$f_q^s = f_a \quad (\text{D-9})$$

$$f_d^s = -\frac{1}{\sqrt{3}}(f_b - f_c) = -\frac{1}{\sqrt{3}}(f_a + 2f_b) \tag{D-10}$$

D.4 同步和静止坐标系之间的变换

使用式 (D-11)，静止参考坐标系可以变换成同步参考坐标系：

$$\begin{bmatrix} f_q^e \\ f_d^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_q^s \\ f_d^s \end{bmatrix} \tag{D-11}$$

使用式 (D-12)，同步参考坐标系可以变换成静止参考坐标系：

$$\begin{bmatrix} f_q^s \\ f_d^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_q^e \\ f_d^e \end{bmatrix} \tag{D-12}$$

附录 E 空间向量脉宽调制

正如第七章中所提到的，空间向量脉宽调制（SVPWM）提供的最大正弦相电压 $V_{\max} = 0.57735 V_{dc}$ ，比正弦脉宽调制^[8]高 15.5%。在我们讨论空间向量脉宽调制以前，必须先通过以下电压方程来了解在逆变器中的电压空间向量概念。

在图 E-1 中的电压可以写成

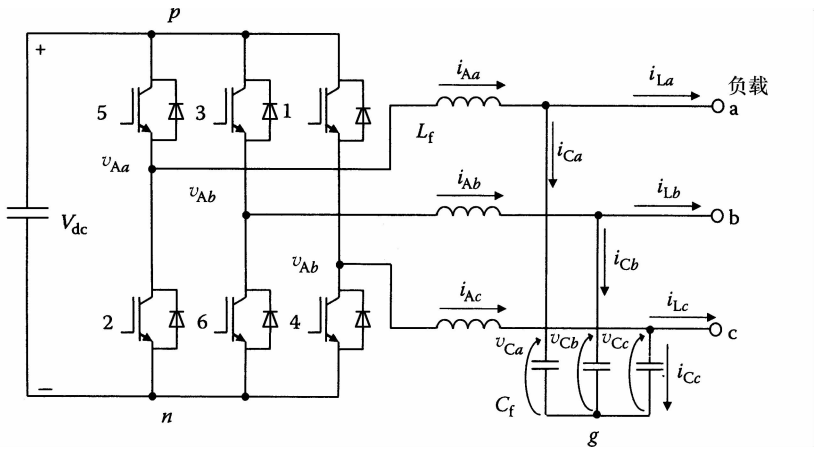


图 E-1 有电感电容滤波器的三相逆变器

(出自 Na, W. , *A study on the output voltage control strategies of 3 -phase PWM inverter for an uninterruptible power supply*, Korea master thesis, Kwangwoon University, Seoul, 1997. 许可使用)

$$\begin{aligned}
v_{Aa} &= L_f \frac{d}{dt} i_{Aa} + v_{Ca} \\
v_{Ab} &= L_f \frac{d}{dt} i_{Ab} + v_{Cb} \\
v_{Ac} &= L_f \frac{d}{dt} i_{Ac} + v_{Cc}
\end{aligned} \tag{E-1}$$

其中 L_f 是电感电容滤波器的电感，其他的电压和电流可在图 E-1 中找到。

在静止参考系中的电压与式 (E-1) 有相同的形式：

$$\begin{aligned}
v_{Aq}^s &= L_f \frac{d}{dt} i_{Aq}^s + v_{Cq}^s \\
v_{Ad}^s &= L_f \frac{d}{dt} i_{Ad}^s + v_{Cd}^s
\end{aligned} \tag{E-2}$$

式 (E-2) 的空间向量形式是

$$V_{Aq}^s = L_f \frac{d}{dt} I_{Aq}^s + V_{Cq}^s \tag{E-3}$$

在式 (E-3) 右侧，电容电压 V_{Cq}^s 的空间向量形式是

$$V_{Cq}^s = V^* e^{j\theta} \tag{E-4}$$

式中， θ 是空间向量的任意相位角。

为了得到图 E-1 中逆变器系统的空间电压向量，逆变器每个引线的开关函数应如下定义

$$S_a, S_b, S_c = \begin{cases} 0, & \text{副引线是开启的} \\ 1, & \text{正引线是开启的} \end{cases} \tag{E-5}$$

从中性的接地点 g ，利用式 (E-5) 中的开关函数，新的逆变器输出电压是

$$\begin{aligned}
v_{Aa} &= S_a V_{dc} + v_{ng} \\
v_{Ab} &= S_b V_{dc} + v_{ng} \\
v_{Ac} &= S_c V_{dc} + v_{ng}
\end{aligned} \tag{E-6}$$

其中 v_{ng} 是负点 n 和中性接地点 g 之间的电位差， V_{dc} 是逆变器的直流连接输入电压。

式 (E-6) 在静止参考系中的新电压方程是

$$\begin{aligned}
v_{Aq}^s &= V_{dc} S_q \\
v_{Ad}^s &= V_{dc} S_d
\end{aligned} \tag{E-7}$$

根据附录 D 中的坐标变换，

$$\begin{aligned}
S_q &= \frac{2}{3} \left(S_a - \frac{1}{2} S_b - \frac{1}{2} S_c \right) \\
S_d &= \frac{1}{\sqrt{3}} (S_b - S_c)
\end{aligned} \tag{E-8}$$

根据开关函数 S_a 、 S_b 和 S_c ，应该存在八个不同的状态。表 E-1 是开关函数的详细变化。我们下面将解释开关时间的计算。

表 E-1 开关状态决定的开关函数变化

电压向量	导电开关			S_a	S_b	S_c	S_q	S_d
V_0	2	4	6	0	0	0	0	0
V_1	6	1	2	1	0	0	$\frac{2}{3}$	0
V_2	1	2	3	1	1	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$
V_3	2	3	4	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$
V_4	3	4	5	0	1	1	$-\frac{2}{3}$	0
V_5	4	5	6	0	0	1	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
V_6	5	6	1	1	0	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
V_7	1	3	5	1	1	1	0	0

空间向量脉宽调节技术是一种确定逆变器开关状态顺序的特别技术。逆变器有 8 个可能的开关状态。如图 E-2 所示。这些状态都映射到 d - q 轴上。表 E-1 所示，有 6 个有效电压空间向量 ($V_1 - V_6$) 和两个空或零电压向量 (V_0, V_7)。当所有上面的开关同时打开而下面的开关同时关闭，或者所有上面的开关同时关闭而所有下面的开关同时打开时，出现空或零电压向量。这种情况导致负载的短路，因此输出电压变成零。

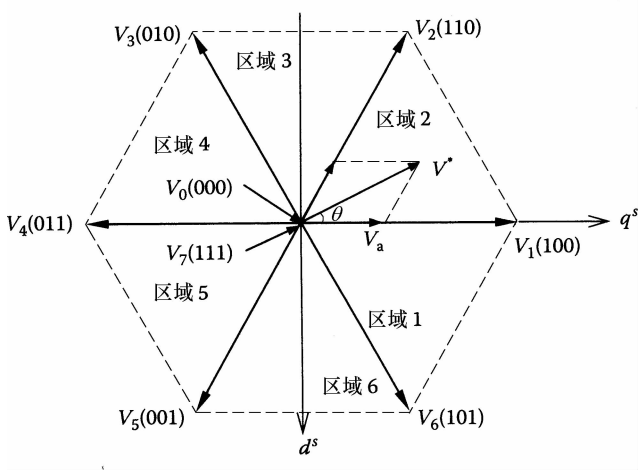


图 E-2 空间向量

举例来说,假定参考电压向量 V^* 是在区域 2, 为了产生脉宽调制输出电压, 需要使用相邻电压向量 V_1 和 V_2 [6]。使用文献 [9] 可以计算开关周期。

$$\int_0^{T_c} V^* dt = \int_0^{t_a} V_1 dt + \int_{t_a}^{t_a+t_b} V_2 dt + \int_{t_a+t_b}^{T_c} (V_0 \text{ or } V_7) dt \tag{E-9}$$

或者

$$V^* \cdot T_c = V_1 \cdot t_a + V_2 \cdot t_b + (V_0 \text{ or } V_7) \cdot T_0 \tag{E-10}$$

式中

$$T_a = \frac{V_a}{V_1} T_c$$
$$T_b = \frac{V_b}{V_2} T_c \tag{E-11}$$

$$T_0 = T_c - (T_a + T_b)$$

为了尽量降低每个逆变器引线的开关频率, 开关模式要按图 E-3 所示的那样排列。这样, 就建立了两个连续 T_c 间隔的对称脉冲图案。

在图 E-3 中, $T_s = 2T_c = 1/f_s$ (f_s 是开关频率) 是采样频率 [6]。如图 E-3 所示, 在前半周期, 开关顺序必须是 (000→100→110→111)。而且在下面的第二个周期, 开关顺序必须是相反的 (111→110→100→000)。需要有效地替换零和空电压向量 (V_0, V_7), 才能减少输出谐波和转矩波动 [9]。

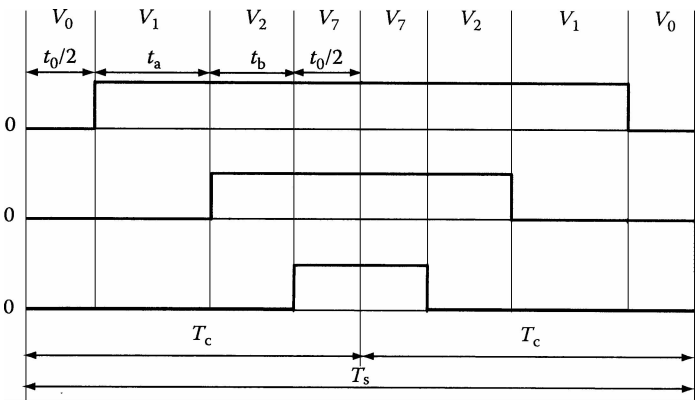
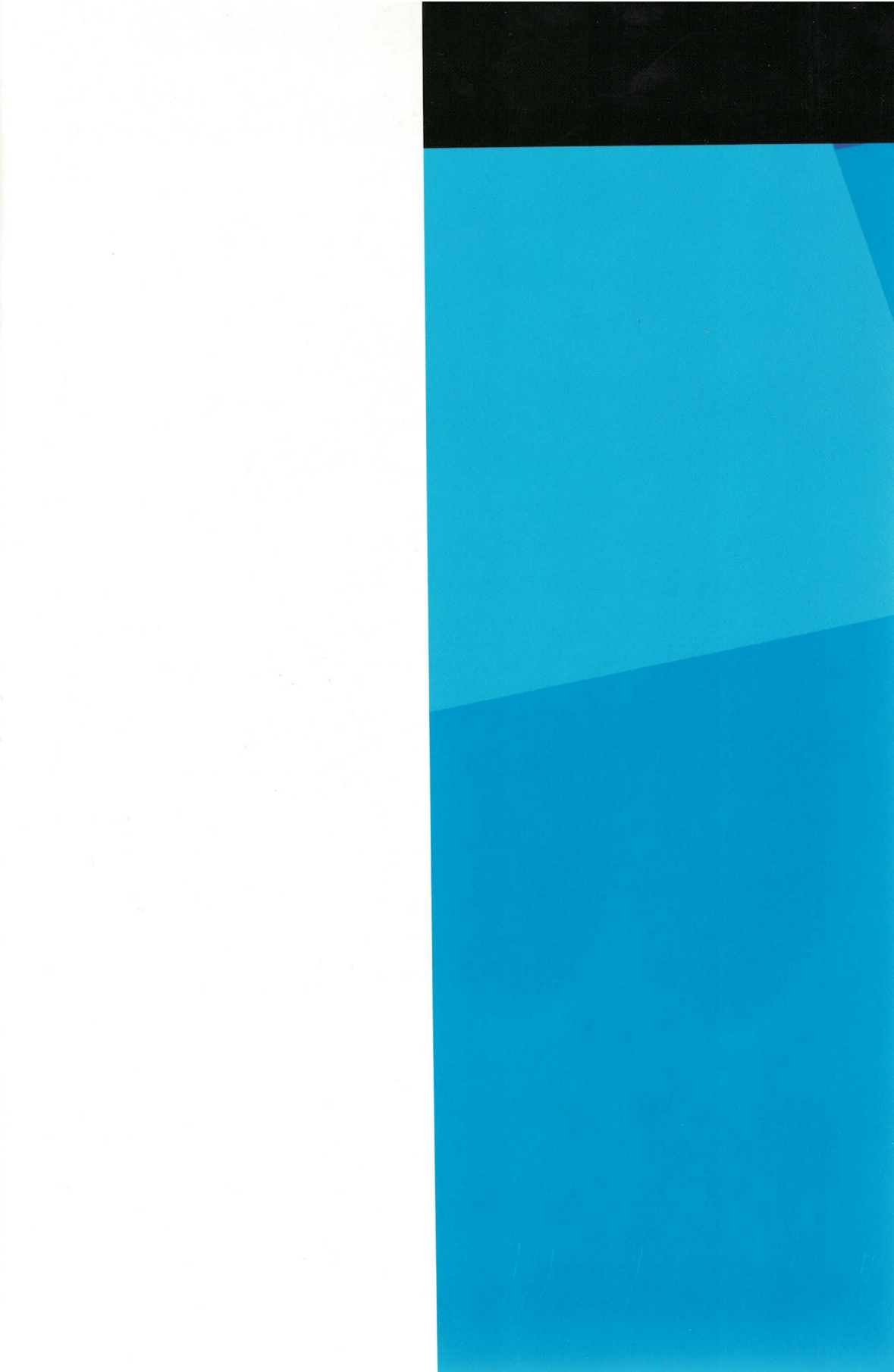


图 E-3 三相逆变器的对称脉冲图案

(出自 Bose, B. K., *Modern Power Electronics and AC Drives*,
Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002. 许可使用)

参 考 文 献

1. K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.
2. A. Isidori, *Nonlinear Control System: An Introduction*, 3rd ed., New York: Springer-Verlag, 1995.
3. D. Cheng, T.J. Tarn, and A. Isidori, Global linearization of nonlinear system via feedback, *IEEE Transactions on AC*, 30(8), 808–811, 1985.
4. Q. Lu, Y. Sun, and S. Mei, *Nonlinear Control Systems and Power System Dynamics*, London: Kluwer Academic Publishers, 2001.
5. J. Liu, Modeling, analysis and design of integrated starter generator system based on field oriented controlled induction machines, PhD thesis, Ohio State University, Columbus, OH, 2005.
6. B.K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2002.
7. W. Na, A study on the output voltage control strategies of 3-phase PWM inverter for an uninterruptible power supply, Korea master thesis, Kwangwoon University, Seoul, 1997.
8. R. Valentine, *Motor Control Electronics Handbook*, New York: McGraw-Hill, 1998.
9. H.W.V.D. Broeck, H.C. Skudelny, and G.V. Stanke, Analysis and realization of a pulse modulator based on voltage space vectors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 24(1), 142–150, 1988.



国际视野 科技前沿

随着替代能源的需求被确立起来，我们已经看到前所未有的燃料电池技术研究。本书是由直接参与研究的科学家所著，讲述了质子交换膜燃料电池建模和控制设计的方法和成果。

本书特色

- ☆ 讨论了质子交换膜燃料电池新的非线性控制设计技术
- ☆ 探讨了质子交换膜燃料电池的动态建模
- ☆ 比较了线性和非线性控制及它们的有效性
- ☆ 介绍了在Simulink中实现燃料电池的动态建模和非线性控制
- ☆ 演示了如何把燃料电池作为分布式发电机整合到公用电力系统负载流量分析中
- ☆ 涉及了燃料电池在汽车、公用电力系统和混合可再生能源系统中的应用

ISBN 978-7-111-34782-8

封面设计：鞠杨

定价：48.00元

地址：北京市百万庄大街22号

电话服务

社服务中心：(010)88361066

销售一部：(010)68326294

销售二部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

邮政编码：100037

网络服务

门户网：<http://www.cmpbook.com>

教材网：<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

上架指导：工业技术 / 能源
/ 燃料电池

ISBN 978-7-111-34782-8



9 787111 347828 >